MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICÁVEIS À INDÚSTRIA PORTUGUESA: UM ENQUADRAMENTO TECNOLÓGICO SUCINTO

MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICÁVEIS À INDÚSTRIA PORTUGUESA: UM ENQUADRAMENTO TECNOLÓGICO SUCINTO

AUTORES

Vítor Magueijo
Estagiário de Investigação

Mª. Cristina Fernandes
Professora Auxiliar no IST

Henrique A. Matos
Professor Auxiliar no IST

Clemente Pedro Nunes
Professor Catedrático no IST

João Paulo Calau
Jorge Carneiro
Fernando Oliveira
Direcção Auditoria Indústria da ADENE

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem todos os contributos fornecidos a este documento pelas várias instituições envolvidas no Grupo Indústria, nomeadamente, a DGEG, a CIP, o LNEG, o INETI (DEECA), a AEP, a AIP e as diferentes Confederações Sectoriais.

ÍNDICE

1.
ENQUADRAMENTO ESTRATÉGICO

1. ENQUADRAMENTO ESTRATÉGICO

1.1 INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS

A utilização eficiente, numa base energética estrategicamente adequada é essencial para a competitividade económica de um país.
Portugal é um país com uma elevada intensidade energética, sendo este um indicador da eficiência energética global do país. De acordo com os dados fornecidos pela ADENE/DGEG [1], entre 1997 e 2007 a evolução da intensidade energética em Portugal, expressa em consumo de energia primária final (tep) por unidade de Produto Interno Bruto (PIB em milhão de euros, a preços constantes de 2000), divergiu significativamente da média europeia (Fig.1.1). No entanto, observa-se para Portugal uma inversão da tendência nos anos entre 2005 e 2007 que ocorreu devido ao efeito cumulativo da diminuição do consumo de energia final e do aumento do PIB.
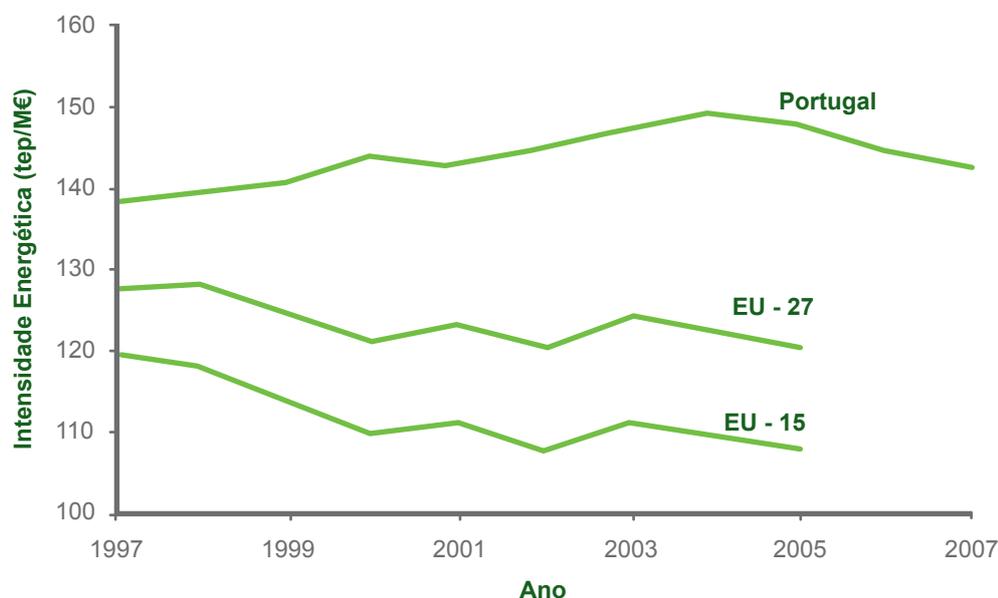
Fig.1.1/ Evolução da Intensidade Energética (Energia para Consumo Final por PIB a preços constantes de 2000) de Portugal comparada com as médias da União Europeia a 15 (UE - 15) e a 27 (EU - 27). Fonte: ADENE/DGEG [1]

A economia portuguesa caracteriza-se por possuir uma intensidade energética e uma intensidade carbónica elevadas e uma dependência muito elevada da importação no que concerne ao consumo de energia primária (cerca de 85 % da energia total necessária, com forte predominância do petróleo). Tal como noutras economias com baixa eficiência energética e fortemente dependentes da importação de energia primária, muito em especial do petróleo e do gás natural, o equilíbrio externo da economia portuguesa é fortemente condicionado pela variação do preço do petróleo. Por isso, nos últimos anos, com a subida do preço do petróleo verificou-se uma perda de competitividade das empresas portuguesas. A nível ambiental, a emissão excessiva de dióxido de carbono (CO_2) e de outros gases com efeito de estufa é uma das principais consequências da falta de eficiência no consumo de energia obtida da queima de combustíveis fósseis. De acordo com o Protocolo de Quioto, os países da UE-15 comprometeram-se a reduzir as emissões de gases com efeito de estufa em 8 % por comparação com os níveis de 1990 [2]. Caso as metas propostas não sejam atingidas até 2012, estes países poderão pagar coimas pesadas e o seu prestígio ambiental será diminuído.

A Tabela 1.1 apresenta para os anos 2003 a 2005, o valor das emissões de CO_2 em Portugal e na totalidade dos países UE-15. No período referido, observa-se que em Portugal a quantidade de CO_2 libertado para a atmosfera aumentou em contraste com a ligeira diminuição observada para os países UE-15. A mesma tabela mostra que em 2005, Portugal encontrava-se 12,3 % acima do valor a atingir até 2012 e que este valor é claramente superior ao registado no conjunto dos países UE-15 (6,8 %). Estes valores mostram que os esforços de Portugal para diminuir as emissões de CO_2 têm tido muito pouco sucesso. A provável continuação da divergência em relação às metas de Quioto para 2012 acarretará não só prejuízos ambientais em termos do aquecimento global do planeta, mas também prejuízos económicos para Portugal.

Tabela 1.1/ Valor das emissões de CO_2 em Portugal e na EU-15

	Emissões CO_2 (Mt)				% acima da meta de Quioto (em 2005)
	2003	2004	2005	Meta Quioto 2012	
Portugal	33,7	34,6	85,5	76,2	**12,3**
UE-15	4 215	4 227	4 192	3 925	**6,8**

Fonte: *European Environment Agency* (EEA) e Portal Europeu da Energia. [2]

Com base nos argumentos económicos e ambientais apresentados, existe a necessidade de poupar energia nos vários sectores da sociedade portuguesa, e para tal são necessários esforços mais ambiciosos e dinâmicos em termos de promoção concreta da eficiência energética. De facto, a utilização mais eficiente da energia contribui para o crescimento económico e o desenvolvimento industrial, para a manutenção de um nível elevado de segurança no fornecimento energético e para reduzir as emissões de CO_2.

Para que os esforços de poupança sejam bem sucedidos, são necessários desenvolvimentos tecnológicos susceptíveis de serem levados à prática, bem como medidas de políticas públicas que regulamentem o consumo energético e as emissões de gases com efeito de estufa e que estimulem em simultâneo a competitividade económica global das empresas portuguesas. Note-se que a diminuição da intensidade energética na maioria dos países europeus deve-se à imposição de medidas de políticas públicas que visam o aumento da poupança e da eficiência energética. Estas medidas afectam praticamente todos os sectores da sociedade, com especial incidência no aquecimento/ arrefecimento de edifícios, na indústria, nos transportes, nos aparelhos eléctricos e nos serviços.

Assim, no âmbito do Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética (PNAEE) aplicável à indústria, pretende-se divulgar no Capítulo 2 deste documento uma análise tecnológica que visa dar um melhor enquadramento prático aos vários níveis de responsabilidade industrial, no sentido destes poderem concretizar melhor a aplicação das Medidas Transversais e Medidas Sectoriais Específicas propostas. Complementarmente, o Capítulo 2 possui também algumas referências bibliográficas que permitirão aos técnicos mais ligados aos vários subsectores industriais aprofundar tecnologicamente alguns temas sempre que tal seja considerado conveniente.

Antes de se fazer essa análise tecnológica mais aprofundada relativamente às medidas que poderão melhorar a eficiência energética da Indústria Transformadora, apresentam-se resumidamente no ponto 1.2 algumas das políticas da UE e de alguns países europeus de referência, para o aumento da poupança e da eficiência energética industrial, o que permite fornecer ao leitor uma base comparativa mais alargada relativamente às medidas aplicadas por alguns dos espaços económicos com os quais Portugal tem um relacionamento económico mais intenso.

1.2 PLANOS DE ACÇÃO PARA A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA VERTENTE INDUSTRIAL: UNIÃO EUROPEIA E PAÍSES DE REFERÊNCIA

1.2.1 UNIÃO EUROPEIA

O Livro Verde para a Eficiência Energética (LVEE) [3] publicado pela Comissão Europeia em 2005 sublinha a necessidade de fortalecer as políticas destinadas a um aumento da eficiência do consumo e da produção de energia. A eficiência energética está sobretudo associada ao controlo e redução do consumo de energia para a mesma riqueza criada (i.e., ao aumento da poupança), embora sejam também necessárias acções específicas no âmbito da produção, transformação e distribuição de energia.

Baseando-se no Livro Verde para a Eficiência Energética, o Conselho Europeu de Março de 2006 estabeleceu a necessidade urgente de ser adoptado um plano de acção ambicioso e realista para a eficiência energética na UE. Após alguns meses de preparação, o Plano de Acção para a Eficiência Energética da UE (PAEE-EU) [4] foi apresentado em Outubro de 2006 com o subtítulo "*Realizing the Potentia*l". De facto, este documento tem como grande objectivo a "realização do potencial" de poupança energética da UE a 25, que segundo os estudos citados no LVEE poderá situar-se num valor global acima dos 20 % em 2020 [3]. Este potencial de poupança de 20 % do actual consumo energético da UE-25 corresponde a uma poupança global de energia primária de cerca de 390 Mtep/ano(1).

O Plano de Acção para a Eficiência Energética da UE (PAEE-UE) necessita de ser monitorizado e actualizado, tendo sido iniciada em 2009 uma revisão intercalar que teve em conta os planos nacionais de acção para a eficiência energética (PNAEEs) dos países membros e as revisões estratégicas da UE no âmbito da energia. De facto, embora o objectivo do PAEE-UE possa ser atingido usando tecnologias actualmente existentes, segundo este plano, deve ser igualmente encorajada a adopção de tecnologias inovadoras que surjam durante o tempo de vida do plano de acção [4].

O LVEE refere que a Indústria Europeia já deu passos no sentido de aumentar a sua eficiência energética, e que motivada por incentivos económicos, é de esperar que a indústria aplique melhorias nos seus processos e nas máquinas por ela utilizadas, de modo a se tornar ainda mais eficiente. Para além dos benefícios económicos directos, a pressão exercida pela legislação europeia e pelas legislações nacionais levam a indústria a utilizar a eficiência energética como um instrumento necessário para respeitar os valores máximos de emissões de gases com efeito de estufa impostos pelos planos nacionais de atribuição de licenças de emissão (PNALEs). Estes valores máximos encontram-se previstos na directiva relativa ao comércio das licenças de emissão (Directiva 2003/87/CE [5]). Até agora, a pressão exercida pela legislação tem levado a um grande número de acordos voluntários em vários sectores industriais, tais como o sector do papel e o sector químico. Estes acordos voluntários assinados pela indústria reforçam as medidas de eficiência energética e têm tido bastante sucesso em países como o Reino Unido e a Holanda [3].

No contexto industrial, o PAEE-UE refere que a utilização das Melhores Tecnologias Disponíveis (MTDs) e de equipamentos mais eficientes, poderá conduzir a enormes oportunidades de poupança. Para a Indústria Transformadora, prevê-se que o potencial global de poupança possa atingir cerca de 25 %, centrando-se em equipamentos tais como os motores eléctricos, ventiladores e material de iluminação. Em 2007, a Comissão Europeia iniciou o processo de adopção de padrões mínimos ecológicos de desempenho energético através da implementação de directivas de rotulagem e de perfil ecológico para 14 grupos de produtos prioritários, incluindo entre outros equipamentos, caldeiras, motores eléctricos e lâmpadas. Como alguns destes produtos são utilizados industrialmente nas áreas com maior potencial de poupança, espera-se que esta medida tenha um impacto forte na eficiência energética industrial.

(1) Valor tendo em conta o consumo de energia primária da UE-25 em 2005 (1750 Mtep).

O PAEE-UE pretende promover a cogeração na indústria, o uso coerente dos impostos para promover a eficiência energética industrial e o financiamento de investimentos que as PMEs (pequenas e médias empresas) e as *ESCO*s (*Energy Service Companies*) efectuem em projectos para realizar essa eficiência. O PAEE-UE pretende também promover programas de treino e de educação de gestores de energia na indústria, e financiar programas de investigação sobre tecnologias que melhorem a eficiência energética de um processo ou equipamento. No campo da cooperação, o PAEE-UE pretende encorajar políticas que lancem programas de financiamento intensivos para a eficiência energética nos novos estados membros da UE (política de coesão), e efectuar parcerias internacionais com países externos à UE que sejam parceiros comerciais.

Para que o PAEE-UE atinja os seus objectivos ambiciosos é necessária a colaboração total das autoridades competentes de todos os estados membros, em particular no que diz respeito ao delineamento dos respectivos PNAEEs. Assim, os PNAEEs deverão estar em consonância com as linhas mestras definidas no PAEE-UE e possuir objectivos igualmente ambiciosos.

Focando agora a atenção nas medidas que afectam o sector industrial, são apresentadas de seguida como exemplos algumas medidas políticas aplicadas a este sector, incluídas nos PNAEEs de três países membros da UE (Dinamarca, Reino Unido e Espanha).

1.2.2 DINAMARCA

As principais medidas do PNAEE (PNAEE-D) [6] aplicadas à indústria foram: *i)* o aumento gradual dos impostos relativos às emissões de gases derivados da queima de combustíveis fósseis; *ii)* a concessão de benefícios fiscais a indústrias que implementem medidas de eficiência energética; *iii)* o incentivo quer à concorrência comercial quer à investigação tecnológica no sector privado do mercado energético; *iv)* o financiamento de projectos públicos de investigação e o apoio a parcerias tecnológicas com o sector privado; *v)* a atribuição de créditos/empréstimos a PMEs para implementação de projectos de eficiência energética; e *vi)* o aumento da divulgação, junto da população, das tecnologias de gestão ambiental e dos benefícios associados à sua utilização [6].

O aumento gradual dos impostos sobre o consumo de energia e as emissões de CO_2 tem como objectivo incentivar as indústrias a assinar acordos voluntários com o Estado, garantindo o cumprimento de um plano de redução do consumo de energia. As indústrias que assinam estes acordos comprometem-se a efectuar um estudo pormenorizado do seu consumo energético, que visa identificar pontos críticos passíveis de melhorias, e, num prazo acordado, a implementar as medidas técnicas necessárias para atingir o aumento de eficiência energética estipulado. Todo este processo está sujeito a auditorias estatais.

Os acordos voluntários assentam na implementação do conceito de Gestão de Energia (*Energy Management*) que assegura a melhoria contínua e constante da eficiência energética de uma empresa. Tipicamente, uma indústria reduz o seu consumo de energia entre 10 a 15 % nos primeiros anos de implementação destes acordos voluntários. Alguns exemplos mostram poupanças superiores a 15 % e retornos de investimento (*paybacks*) inferiores a 4 anos. As medidas técnicas a aplicar envolvem a manutenção e monitorização de equipamentos, a alteração de procedimentos, a formação dos funcionários e a concepção eficiente, sob o ponto de vista energético, de equipamentos e instalações. Esta última característica assegura a rentabilidade dos investimentos gastos na optimização de novas instalações.

As PMEs que tenham dificuldades financeiras para implementar as medidas resultantes do acordo podem requerer ao estado o financiamento parcial das mesmas. O financiamento está condicionado à verba disponível no orçamento de estado e ao excedente dos impostos proveniente do aumento das taxas sobre o consumo de energia e as emissões de CO_2.

As indústrias que cumpram os acordos com o estado têm acesso a uma tarifa fiscal mais reduzida (*green tax*) que é proporcional à melhoria da eficiência energética. O imposto ecológico dinamarquês (*green tax*) foi colocado em acção em 1996 e foi avaliado em 1998/99 com o propósito de estimar os impactos económicos e ambientais deste sistema de taxação energética. A avaliação concluiu que o sistema leva a poupanças energéticas significativas de uma forma economicamente eficiente e sem descurar a competitividade internacional da indústria [8].

No ano de 2001, aproximadamente 300 empresas, representando cerca de 60 % do consumo total de energia da Indústria Dinamarquesa, tinham já assinado acordos voluntários de eficiência energética com a Agência Dinamarquesa para a Energia. Conseguiu-se que até 2005 as indústrias aderentes aos acordos reduzissem uma média de 6 % nas suas emissões de CO_2 e diminuíssem a sua factura energética, aumentando assim a sua competitividade internacional [9].

Em Junho de 2005, um acordo entre o governo dinamarquês e outros partidos da oposição adicionou novas iniciativas ao plano de acção governamental para a poupança energética em vários sectores (excluindo o sector dos transportes). Estas iniciativas complementares impõem um objectivo anual de poupança 3 vezes superior ao do período anterior a 2005 e pretendem atingir uma poupança energética global com o valor médio anual de 7,5 PJ (179 ktep) durante o período de 2006-2013 [6].

1.2.3 REINO UNIDO

No Reino Unido as medidas políticas incidem principalmente sobre a redução das emissões de gases com efeito de estufa. No entanto, estas medidas estão intimamente ligadas à eficiência energética, uma vez que aumentos na eficiência energética produzem reduções nas emissões. Algumas das medidas políticas do PNAEE do Reino Unido [10] aplicadas à indústria englobam: *i)* o *Climate Change Levy; ii)* os *Climate Change Agreements; iii)* o *Carbon Trust* e o *iv) United Kingdom Emissions Trading Scheme.*

O *Climate Change Levy (CCL)* é um imposto sobre a utilização de energia que impõe taxas fiscais mais elevadas às indústrias mais gastadoras de energias não renováveis. O dinheiro resultante destas taxas serve para investir em tecnologias e equipamentos com maior eficiência energética e, consequentemente, menos emissões de carbono.

Com os *Climate Change Agreements* (acordos voluntários, *CCA*), o governo tenta aliciar as empresas a aceitar um acordo de redução de emissões de carbono, em troca de um vantajoso desconto fiscal de 80 % sobre o *Climate Change Levy*.

Este acordo foi negociado com 44 sectores industriais, sendo os resultados desta política surpreendentemente positivos, pois 24 desses sectores cumpriram totalmente as metas de redução. De facto, em 2003, 88 % das unidades que se submeteram ao acordo conseguiram atingir a sua meta.

O *Carbon Trust* é uma estrutura que visa informar e auxiliar as indústrias que pretendam reduzir as suas emissões de gases poluentes. As suas actividades baseiam-se em cinco grandes áreas:

- Percepção - diagnóstico dos problemas que levam a que uma empresa não seja energeticamente eficiente;
- Solução - encontro de soluções para esses problemas;
- Inovação - criação de novas tecnologias para o aumento da eficiência energética;
- Iniciativa - financiamento de iniciativas que permitem o aparecimento de novas empresas no ramo das tecnologias energeticamente eficientes;
- Investimento - financiamento de indústrias, com fundos governamentais, para que possam efectuar as mudanças nas suas estruturas ou tecnologias, de modo a aumentar a sua eficiência energética.

Resumindo, esta organização aposta na eficiência energética e na redução de emissões de gases poluentes e aconselha as empresas a aderirem aos *CCAs* e a implementarem soluções ecológicas, financiando-as.

O *United Kingdom Emissions Trading Scheme* (UK-ETS) é um esquema que tem como objectivo reduzir as emissões de gases poluentes, para que com isso se cumpra o Protocolo de Quioto e adiram ao rentável mercado de carbono. Para fugir às coimas, as indústrias entram no mercado de carbono e tentam comprar emissões de toneladas de CO_2 a preços inferiores, tornando o mercado extremamente activo.

As políticas implementadas no Reino Unido contribuíram para uma melhoria significativa da eficiência dos consumos energéticos, o que pode ser comprovado pela diminuição substancial imediata das emissões de CO_2. De facto, logo em 2002, no primeiro ano em que as medidas foram aplicadas, a redução das emissões atingiu o valor de 4,64 milhões de toneladas de CO_2. Esta redução aumentou para 5,2 milhões de t CO_2 em 2003 e 5,9 milhões de t CO_2 em 2004.

1.2.4 ESPANHA

A Estratégia de Poupança e Eficiência Energética em Espanha aprovada a 28 de Novembro de 2003 propõe para cada um dos principais sectores envolvidos uma série de medidas que devem ser implementadas durante o período de 2004-2012 [15].

No âmbito desta estratégia, as medidas aplicáveis ao Sector Industrial espanhol são as seguintes:

- Realização de Auditorias Energéticas;
- Projectos Empresariais de Eficiência Energética (Acordos Voluntários);
- Programas de Ajudas Públicas.

As Auditorias Energéticas nos diferentes sectores industriais possibilitam o estudo detalhado e exaustivo dos processos produtivos e mais concretamente identificar os principais equipamentos consumidores de energia. Permitem ainda determinar com alguma precisão os investimentos necessários para a execução das medidas detectadas assim como a rentabilidade e viabilidade das mesmas.

Os principais objectivos destas Auditorias Energéticas são:

- Determinar o potencial de poupança de energia nas empresas do sector industrial;
- Facilitar a tomada de decisão dos empresários no âmbito do investimento em Poupança e Eficiência Energética;
- Determinar o *benchmarking* dos processos produtivos auditados.

Os Acordos Voluntários têm como objectivo, fomentar a adopção de medidas de poupança de energia e comprometer as Associações Empresariais e as Indústrias a alcançar o potencial de poupança de energia estabelecido por Sector. No entanto, este compromisso na consecução dos objectivos energéticos não deve comprometer a competitividade das empresas.

Os Acordos Voluntários devem considerar os seguintes pontos essenciais:

- O potencial de poupança detectado e a viabilidade da sua execução;
- A vinculação explícita das empresas do subsector ou ramo de actividade considerado;
- As linhas de financiamento para incentivar a poupança energética;
- A possibilidade das empresas vinculadas formalmente terem tratamento preferencial.

O objectivo do Programa de Ajudas Públicas é facilitar a viabilidade económica dos investimentos na poupança e eficiência energética, com a finalidade de alcançar o potencial de poupança de energia identificado. Pretende-se assim promover a substituição de equipamentos e de instalações ineficientes, privilegiando a utilização de tecnologias de alta eficiência energética que minimizem as emissões de CO_2.

Para o período 2000-2012, o cenário base da Estratégia de Poupança e Eficiência Energética [15] prevê que o sector industrial espanhol registe um aumento de 14 498 ktep no consumo total de energia. O potencial da poupança de energia detectado é de 2351 ktep até ao ano 2012, o que representa uma poupança de energia de 4,8 % respeitante ao consumo no mesmo ano.

2.
ENQUADRAMENTO TECNOLÓGICO DAS MEDIDAS PARA O AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA INDÚSTRIA

2. ENQUADRAMENTO TECNOLÓGICO DAS MEDIDAS PARA O AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA INDÚSTRIA

O aumento da eficiência energética na Indústria Transformadora nacional exige, à semelhança do verificado em outros países, uma atitude pró-activa da parte dos industriais para uma actuação em termos de adequação efectiva dos seus equipamentos e processos a novas tecnologias e estratégias actualmente disponíveis.

Foram analisados documentos referentes às *BAT - Best Available Tecnologies*, publicados anteriormente pela Comissão Europeia [11][12][13][14], e por países como a Espanha [15][16][17][18][19][20], a Holanda [21] e os EUA através do *U.S. Department of Energy* [22]. Além destes, foram também analisados outros documentos publicados pela Agência Internacional da Energia [23][24]. Todas as publicações acabadas de referir serviram para seleccionar, de entre um elevado número de medidas de actuação, aquelas que, em termos da realidade portuguesa, podem conduzir a uma maior eficiência energética em todos os Sectores da Indústria Transformadora.

A análise dos referidos documentos conduziu a dois conjuntos de medidas classificados como Medidas Transversais e Medidas Específicas de cada Sector da Indústria Transformadora (ver Fig. 2.1). As medidas transversais traduzem quatro grupos de actuação tecnológica: Motores Eléctricos, Produção de Calor e Frio, Iluminação, Eficiência do Processo Industrial e Outras Medidas não especificadas. Estas medidas foram agrupadas desta forma pelo facto de serem horizontais, isto é, da sua aplicabilidade ser generalizada em todos os doze sectores da Indústria Transformadora. Em complemento a estas medidas foram seleccionadas, dentro de cada um dos doze sectores mencionados, as referidas Medidas Específicas que traduzem possíveis actuações apenas aplicáveis com intensidade considerável em cada sector específico.

(1) Em relação ao balanço energético, juntaram-se os sectores do plástico e da borracha, e não foi considerado o sector Outros
Fonte: Análise IST/ADENE.

Fig. 2.1/ Principais grupos de Medidas Transversais e de Medidas Específicas Sectoriais para a Indústria Transformadora.

Todas as Medidas (Transversais e Específicas) foram profundamente analisadas pelas **Confederações Industriais Portuguesas:**
Confederação da Indústria Portuguesa (CIP), Associação Industrial Portuguesa (AIP), e Associação Empresarial Portuguesa (AEP));
e pelas **Associações Empresariais**:
Associação Portuguesa das Empresas Químicas (APEQ), Associação Portuguesa de Fundição (APF), Associação Técnica da Indústria do Cimento (ATIC), Associação Têxtil e Vestuário de Portugal (ATP), Associação da Indústria Papeleira (CELPA), Centro Tecnológico das Indústrias Têxtil e do Vestuário de Portugal (CITEVE), Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro (CTCV), Centro Tecnológico da Indústria do Couro (CTIC) e Federação das Indústrias Portuguesas Agro-alimentares (FIPA).
Os resultados obtidos devem-se em grande parte aos contributos qualitativos e quantitativos destas entidades após validação pelo Grupo de Trabalho Indústria.

Desta análise aprofundada resultou a escolha duma lista de Medidas/Tecnologias que foram consideradas viáveis e possuidoras de elevadas hipóteses de sucesso. Estas medidas seleccionadas, que compõem os principais grupos de medidas transversais e sectoriais, estão listadas na Tabela 2.1. Note-se que se espera que as poupanças anuais previstas nesta tabela se poderão começar a concretizar cinco anos após o início do PNAEE.

Tabela 2.1/ Medidas seleccionadas para aumentar a eficiência energética da Indústria Portuguesa: Medidas Transversais e Sectoriais.

Transversais ou Horizontais			
Âmbito	*Medida / Tecnologia*	*Poupança Total* tep / ano	*%*
Sistemas accionados por motores eléctricos	Optimização de motores	19 115	0,35
	Sistemas de bombagem	2 294	0,04
	Sistemas de ventilação	510	0,01
	Sistemas de compressão	5 161	0,10
	Total	**27 080**	**0,50**
Produção de calor e frio	Cogeração	27 000	0,50
	Sistemas de combustão	64 043	1,18
	Recuperação de calor	72 048	1,34
	Frio industrial	1 338	0,02
	Total	**164 429**	**3,04**
Iluminação	**Total**	**1 911**	**0,04**
Eficiência do processo industrial / Outros	Monitorização e controlo	10 554	0,20
	Tratamento de efluentes	2 402	0,40
	Integração de processos	94 986	1,76
	Manutenção de equipamentos	24 871	0,46
	Isolamentos térmicos	18 012	0,33
	Transportes	48	0,001
	Formação e sensibilização de recursos humanos	3 166	0,06
	Redução da energia reactiva	1 125	0,02
	Total	**155 164**	**2,87**
Total das Medidas Transversais		**348 584**	**6,45**

Sectoriais ou Específicas			
Sector	*Medida / Tecnologia*	*Poupança Total* tep / ano	*%*
Alimentação e Bebidas	Optimização da esterlização	2 808	0,052
	Processos de separação com membranas	1 354	0,025
	Mudança de moinhos horizontais para verticais	1 312	0,024
	Destilação sob vácuo	768	0,014
	Total	**6 242**	**0,115**
Cêramica	Optimização de fornos	5 125	0,095
	Melhoria de secadores	591	0,01
	Extrusão com secadores	860	0,016
	Extrusão dura	1 155	0,021
	Optimização de produção de pó para prensagem	997	0,018
	Utilização de combustíveis alternativos	[a]	[a]
	Total	**8 728**	**0,161**
Cimento	Optimização de fornos	0	0
	Optimização de moagens	0	0
	Utilização de combustíveis alternativos (p.ex.biomassa)	104 388 [b]	0 [b]
	Redução da utilização de clínquer no cimento	[a]	[a]
	Utilização de gás natural (em substituição do coque de petróleo)	0	0
	Total	**0**	**0**
Madeira e Artigos de Madeira	Transportadores mecânicos em vez de pneumáticos	11	0,0002
	Aproveitamento de sub-produtos de biomassa	469	0,0087
	Optimização de fornos de secagem contínua	47	0,0009
	Total	**527**	**0,0097**
Metalo-electro-mecânica	Combustão submersa para aquecimento de banhos	70	0,0013
	Reutilização de desperdícios	349	0,0065
	Optimização de fornos	670	0,0124
	Total	**1 089**	**0,0202**
Metalurgia e Fundição	Melhoria na qualidade dos ânodos e cátodos	62	0,0012
	Sector da fusão	197	0,0036
	Número de fundidos por cavidade	369	0,0068
	Rendimento do metal vazado	49	0,0009
	Diminuição da taxa de refugo	10	0,0002
	Despoeiramento	37	0,0007
	Aumento da cadência do ciclo	4	0,0001
	Redução de sobreespessuras	2	0,00004
	Total	**730**	**0,0135**

Pasta e Papel	Gaseificação / Queima de licor negro e outros resíduos	5 320	0,098
	Optimização de operações de secagem	4 268	0,079
	Total	**9 588**	**0,177**
Químicos, Plásticos e Borracha	Novas operações de separação (p. ex. membranas)	4 946	0,09
	Utilização de novos catalisadores	2 638	0,05
	Optimização das destilações	1 757	0,03
	Total	**9 341**	**0,17**
Siderurgia	Melhoria dos fornos eléctricos	159	0,003
	Processos de "*smelting reduction*"	363	0,007
	Fundição e conformação simultâneas	2 071	0,038
	Total	**2 593**	**0,048**
Têxtil	Optimação de banhos	1 442	0,0267
	Pré-secagem mecânica / infravermelha (IV)	125	0,0023
	Aquecimento de águas por painéis solares	641	0,0119
	Optimização dos processos de produção têxtil	88	0,0016
	Total	**2 296**	**0,0425**
Vestuário, Calçado e Curtumes	Melhorias em limpezas / banhos	20	0,0004
	Tecnologias de corte e de união de peças	7	0,0001
	Aquecimento de águas por colectores solares	51	0,0009
	Total	**78**	**0,0015**
Vidro	Optimização de fornos	1 034	0,02
	Utilização de vidro usado (reciclagem)	2 010	0,04
	Total	**3 044**	**0,06**
Total das Medidas Sectoriais		**44 256**	**0,82**
Total Global (Medidas Transversais + Medidas Sectoriais)		**392 840**	**7,27**

2.1 MEDIDAS TRANSVERSAIS

As Medidas Transversais são as que podem ser aplicadas à generalidade das indústrias existentes em Portugal. As medidas deste tipo são, pois, aquelas que proporcionam maiores efeitos em termos do aumento da eficiência energética para o conjunto da economia portuguesa e, como tal, é importante que os principais responsáveis pelo sector industrial possuam dados tecnológicos sucintos sobre a importância e o potencial impacto técnico-económico destas várias medidas. É este o objectivo principal do presente capítulo.

2.1.1 SISTEMAS ACCIONADOS POR MOTORES ELÉCTRICOS

2.1.1.1 Motores eléctricos

De todos os tipos de motores, os motores eléctricos são os mais utilizados, pois combinam as vantagens da utilização de energia eléctrica – transporte fácil, limpeza e simplicidade de comando - com a sua construção simples e uma grande versatilidade de adaptação às mais diversas cargas.

Na União Europeia, os motores eléctricos são os equipamentos mais disseminados em todos os sectores industriais, usando cerca de 70 % da energia eléctrica total consumida na indústria [25]. Em Portugal, são responsáveis por mais de 70 % do consumo de electricidade da indústria, e por cerca de 30 % do consumo eléctrico global do País [26].

A Fig. 2.2 apresenta a decomposição do consumo de electricidade dos motores, pelas principais utilizações finais na Indústria Portuguesa. Como se pode ver, as aplicações em que ocorre a movimentação de fluidos (sistemas de bombagem, ventilação e compressão de ar) representam 61 % do consumo eléctrico total dos motores industriais [27].
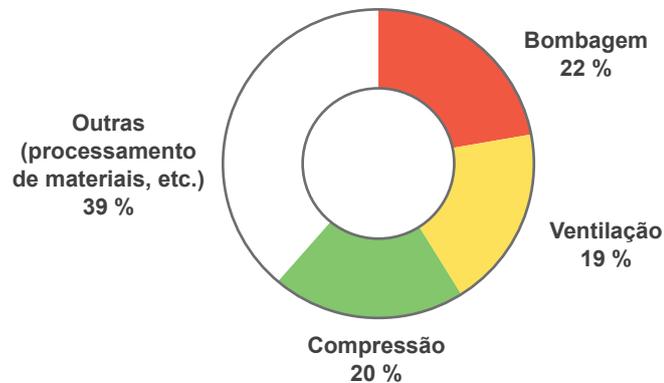
Fig. 2.2 / Consumo de energia dos motores eléctricos na Indústria Portuguesa. Figura adaptada de [27].

Os motores eléctricos são máquinas destinadas a transformar energia eléctrica em energia mecânica, que podem ser alimentados com corrente contínua ou alternada. Os motores eléctricos alimentados com corrente alternada podem ser divididos em duas categorias: síncronos e assíncronos (ou de indução) (Fig. 2.3).

Fig. 2.3 / Classificação de motores eléctricos.

Os motores de corrente contínua (DC) são normalmente motores de custo elevado que precisam de uma fonte de corrente contínua ou de um dispositivo que converta a corrente alternada em contínua. Podem funcionar com velocidade variável e são muito fáceis de controlar e precisos. Só se usam em casos especiais onde as exigências compensam o custo mais alto da sua instalação.

Os motores de corrente alternada (AC) são os mais utilizados porque a distribuição de energia eléctrica na rede é feita através de corrente alternada. O princípio de funcionamento baseia-se no campo girante que surge quando um sistema trifásico de correntes alternadas é aplicado em pólos desfasados de 120º.

Os motores síncronos funcionam com velocidade fixa. Utilizam um circuito induzido que possui um campo constante pré-definido, e com isso, aumentam a resposta ao processo de arrasto criado pelo campo girante. São geralmente utilizados quando se necessita de velocidades estáveis, com cargas variáveis. Também podem ser utilizados para grandes potências, com um binário constante.

Os motores assíncronos ou de indução funcionam normalmente com velocidade constante, que varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada ao eixo. Devido à sua grande simplicidade, robustez, baixo custo e manutenção mínima, são os motores mais utilizados. De facto, estes motores são utilizados em quase todos os tipos de máquinas eléctricas encontradas na indústria, p.ex. bombas, ventiladores, compressores de ar, misturadores, moinhos, guinchos, elevadores, tapetes rolantes, teares, máquinas-ferramenta e máquinas de tracção [27].

Muitos motores em funcionamento não se encontram devidamente dimensionados para alimentar o sistema de potência em que se encontram inseridos, trabalhando em regime de carga parcial ou variável ao longo do tempo. Esta situação é bastante frequente devido ao habitual sobredimensionamento dos motores eléctricos que alimentam bombas, ventiladores, compressores, transportadores mecânicos, *etc.*

Muitas vezes, embora o motor eléctrico esteja correctamente dimensionado e funcione em condições adequadas, existem perdas noutras partes do sistema de potência. Aqui, define-se sistema de potência como sendo um sistema que produz trabalho mecânico a partir de energia eléctrica, possuindo para o efeito várias partes/secções, incluindo a alimentação de energia mecânica pelo motor eléctrico, a transmissão da energia mecânica ao equipamento utilizador final e a aplicação dessa energia pelo equipamento utilizador final (p.ex. bombas, ventiladores).

Para aumentar a eficiência dos sistemas de potência industriais têm sido desenvolvidas e aplicadas várias tecnologias que incluem os motores eléctricos de alto rendimento, os variadores electrónicos de velocidade (VEVs), a melhoria do desempenho dos equipamentos utilizadores finais, a optimização dos sistemas de transmissão mecânica entre o motor e o equipamento utilizador final, *etc.*

Os custos elevados da energia eléctrica fazem com que a eficiência dos motores e dos sistemas de potência de que fazem parte, seja um assunto premente. O enorme peso dos motores eléctricos no consumo de electricidade industrial e a existência de técnicas/ medidas que permitem aumentar a eficiência energética, transformam o campo de aplicação dos motores eléctricos numa área onde os potenciais de poupança de energia são muito significativos.

2.1.1.2 Optimização de motores

A transformação de energia eléctrica em energia mecânica por um motor eléctrico tem sempre perdas inerentes (Fig. 2.4).
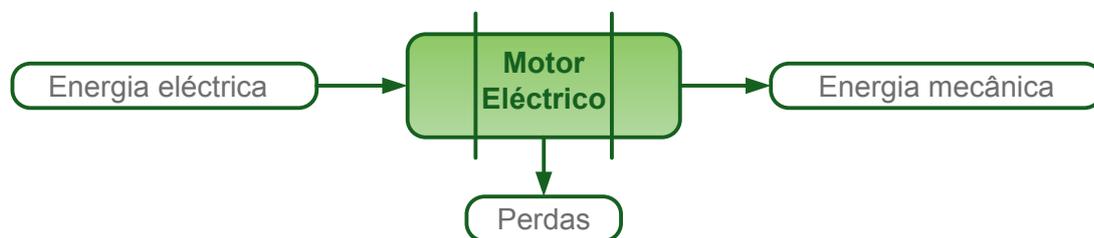
Fig. 2.4/ Balanço energético simples a um motor eléctrico.

As perdas são quantificadas através do rendimento do motor, η, que é igual à potência mecânica (P_{mec}) disponível no veio do motor a dividir pela potência eléctrica (P_{el}) fornecida ao motor:

$$\eta = P_{mec} / P_{el} = (P_{el} - perdas) / P_{el} \qquad \text{(Eq. 1)}$$

As perdas num motor de indução correspondem à energia que não é convertida em trabalho útil. As perdas num motor podem ser: perdas térmicas no cobre por efeito de Joule, perdas magnéticas no ferro, perdas mecânicas e perdas extraviadas.

As perdas por efeito de Joule (perdas de calor), que ocorrem nos condutores de cobre dos enrolamentos do estator e na gaiola do rotor, devem-se à passagem da corrente e são proporcionais ao quadrado da corrente e ao valor da resistência. As perdas de calor provocam um aumento de temperatura do motor, que sendo excessivo, pode conduzir a uma redução substancial do seu tempo de vida útil.

As perdas magnéticas no ferro estão associadas à variação do fluxo magnético no tempo, produzindo correntes induzidas no ferro (correntes de Foucault) e perdas por histerese associadas aos ciclos de magnetização do ferro. As perdas magnéticas no ferro são aproximadamente proporcionais ao quadrado da densidade do fluxo magnético.

As perdas mecânicas derivam do atrito nos rolamentos e da ventilação do motor, enquanto que as perdas extraviadas, também conhecidas como perdas suplementares, estão associadas a imperfeições no fabrico dos motores, nomeadamente às distorções do entreferro, às irregularidades na densidade de fluxo magnético no entreferro e à distribuição não uniforme da corrente dos condutores.

As medidas para a optimização da eficiência energética dos motores eléctricos e sistemas de potência associados têm como objectivo a minimização das perdas energéticas inerentes. Neste âmbito, as medidas seguintes encontram-se entre as mais efectivas:

- Substituir os motores eléctricos convencionais avariados ou em fim de vida por motores mais eficientes;
- Avaliar o potencial de utilização de variadores electrónicos de velocidade para ajustar a velocidade do motor de acordo com a carga;
- Utilizar arrancadores suaves para evitar picos de corrente durante o arranque;
- Garantir a manutenção adequada dos motores;
- Evitar o sobredimensionamento dos motores e desligar os mesmos quando estes não estão a ser utilizados.

Pela sua importância, analisam-se de seguida de forma mais detalhada duas dessas medidas.

Substituição de motores convencionais por motores mais eficientes

Os motores de alta eficiência (MAE), tal como o próprio nome indica, apresentam um rendimento e um factor de potência mais elevados que os motores convencionais (standard). A melhoria de rendimento obtida para os motores de alta eficiência relativamente aos motores convencionais situa-se normalmente nos 3 - 4 %, podendo, no entanto, atingir um máximo de 8 %. Este desempenho é conseguido à custa quer da utilização de melhores materiais construtivos e melhores acabamentos, quer pela alteração das características dimensionais do motor (aumento da secção dos condutores no estator, aumento do comprimento do circuito magnético, *etc.*) [26].

O Comité Europeu de Fabricantes de Máquinas Eléctricas e de Sistemas Electrónicos de Potência (CEMEP) e a Comissão Europeia (CE) estabeleceram, num acordo voluntário firmado em 1998 [29], um esquema de rotulagem da eficiência do motor aplicado a motores de indução trifásicos de gaiola de esquilo, de 2 e 4 pólos (400 V, 50 Hz, tipo de funcionamento S1), com potências úteis entre 1,1 e 75 kW. Para os motores com estas características, o esquema de rotulagem CEMEP-CE estabelece 3 classes de rendimentos que se encontram designadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2/ Classificação CEMEP-CE da eficiência de motores eléctricos.

Classe de eficiência do motor	Denominação da classe
EFF3	Motores convencionais com eficiências menores
EFF2	Motores de eficiência melhorada
EFF1	Motores de alta eficiência

A Fig. 2.5 mostra para a gama de potências abrangida por esta classificação os domínios de rendimento/ eficiência dos motores das classes EFF1, EFF2 e EFF3.
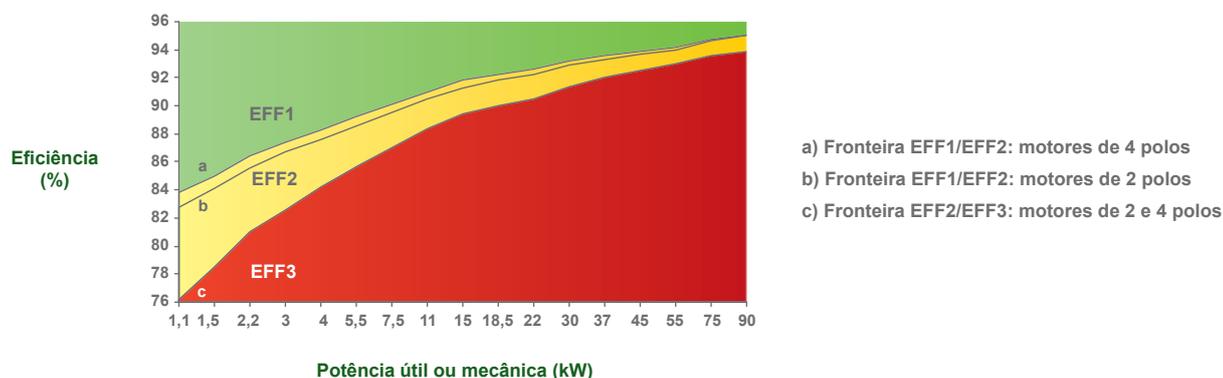
Fig. 2.5/ Eficiência *vs* Potência útil para motores das classes EFF1, EFF2 e EFF3 de acordo com o esquema de rotulagem CEMEP-CE. Fonte: [28].

Com base na Fig. 2.5, a Tabela 2.3 apresenta, para vários motores de 4 pólos com diferentes potências úteis e para um período de funcionamento de 4000 h/a, os valores mínimos de poupança energética possíveis de obter através da substituição de motores de classe EFF3 por motores de classe EFF1.

Tabela 2.3/ Economias energéticas obtidas através da substituição de motores de classe EFF3 por motores de classe EFF1: valores calculados para motores com diferentes potências úteis e para um período de funcionamento de 4000 h/a.

	Potência útil (kW)			
	4	**22**	**45**	**75**
Eficiência máxima de motor classe EFF3 (%)	84,2	90,5	92,5	93,6
Consumo energético (MW.h/a)	19,0	97,2	194,6	320,5
Eficiência mínima de motor classe EFF1 (%)	88,3	92,6	93,9	94,7
Consumo energético (MW.h/a)	18,1	95,0	191,7	316,8
Redução energética mínima (%)	**4,6**	**2,3**	**1,5**	**1,2**
Redução energética mínima (MW.h/a)	**0,9**	**2,2**	**2,9**	**3,7**

Apesar de serem mais económicos energeticamente, os motores de alta eficiência, pela sua concepção, são motores que exigem um investimento inicial cerca de 25 % a 30 % superior em relação aos motores convencionais [26]. Face a este acréscimo de custos de investimento, deve ser sempre efectuada uma avaliação técnico-económica do investimento através de uma análise prévia custo-benefício.

A avaliação económica do investimento ligado à substituição de um motor convencional por um motor de alta eficiência é feita através do cálculo do tempo de recuperação do investimento (*payback*). Para tal usa-se a expressão

$$\text{Tempo de recuperação do investimento (anos)} = \frac{\Delta\text{Investimento (€)}}{\text{Economia anual (€/a)}} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

em que:
ΔInvestimento é dado pela diferença entre o custo do motor de alta eficiência e o custo do motor standard;

Economia anual é dada por: $Economia\ anual\ (€/a) = tC_{el}\left(\frac{P_{st}}{\eta_{st}} - \frac{P_{MAE}}{\eta_{MAE}}\right)$, sendo:

t é o número de horas de funcionamento do motor num ano;
C_{el} é o custo/preço médio da electricidade em €/kW.h;
P_{st} é a potência útil mecânica do motor standard em kW;
η_{st} é o rendimento do motor standard (fracção);
P_{MAE} é a potência útil mecânica do motor de alta eficiência em kW;
η_{MAE} é o rendimento do motor de alta eficiência (fracção).
(Notar que a potência útil mecânica é calculada pelo produto da potência nominal do motor pelo factor de carga).

No entanto, na maioria dos casos, a substituição de um motor convencional por um motor de alta eficiência é justificada, sendo o investimento amortizado em 1 a 2 anos para períodos de funcionamento à volta das 4000 h/a, e em cerca de 3 anos para 2000 h/a de funcionamento [26].

Utilização de variadores electrónicos de velocidade (VEVs)

Vários estudos apontam para a utilização de variadores electrónicos de velocidade (VEVs), como a medida com maior potencial de poupança em sistemas motorizados devido ao seu papel extremamente importante na poupança directa de energia. O artigo de Almeida *et al.* [25] apresenta os resultados de uma investigação a nível europeu (2) sobre as considerações técnicas e económicas da aplicação de VEVs a sistemas motorizados, e desde que foi publicado, tem sido um documento-referência sobre este assunto.

Na indústria em Portugal, o sobredimensionamento de motores de indução é uma situação muito frequente, devido à utilização sistemática de factores de segurança muito elevados. Como muitas vezes não se sabe com rigor qual a carga que o motor vai ter de vencer, opta-se por sobredimensionar este e, por vezes também, o equipamento actuado pelo motor.

O sobredimensionamento excessivo (*i.e.*, superior a 30 %) dos motores de indução acarreta três desvantagens principais:

- Maior investimento inicial na aquisição do motor e da aparelhagem associada;
- Diminuição do rendimento do motor, o que leva a maiores custos de operação;
- Diminuição do factor de potência da instalação, o que leva a um aumento da factura eléctrica ou à necessidade de aquisição de equipamentos para compensar o factor de potência.

Assim, para a maioria das aplicações, seria benéfico em termos de consumo de energia eléctrica e de desempenho global, se a velocidade do motor se ajustasse às cargas ou necessidades do processo. A velocidade dos motores de indução é determinada pela frequência da tensão de alimentação, pelo seu número de pólos e pelo seu factor de carga (a velocidade decresce ligeiramente à medida que a carga aumenta). Assim, para controlar a velocidade dos motores sem recurso a dispositivos mecânicos externos, é necessário variar a frequência da tensão de alimentação.

Normalmente, os VEVs convertem a tensão da rede de 50 Hz numa tensão contínua e em seguida sintetizam uma frequência variável sob controlo externo do utilizador que pode ir de 0 a 150 Hz consoante o tipo de aplicações.
Há diversos tipos de configuração do circuito electrónico dos VEVs, consoante o tipo de motor e a gama de potência. Os tipos mais comuns de VEVs têm uma configuração esquemática igual à da Fig. 2.6.

(2) Investigação efectuada no âmbito do programa SAVE II (1998-2002) sobre eficiência energética e que envolveu 6 países: Alemanha, Dinamarca, França, Holanda, Portugal e Reino Unido.

Fig. 2.6/ Configuração de um VEV.

Os VEVs com inversor por fonte de tensão (VSI) e modulação por largura de impulso (PWM) são os que mais se utilizam para o controlo de motores de indução. (Nota: A tecnologia VSI tem sido progressivamente abandonada devido aos harmónicos gerados e ao baixo factor de potência quando a carga é reduzida). Este tipo de VEVs é basicamente constituído por um rectificador (controlado ou não controlado) que converte a tensão alternada em contínua e por um inversor que converte a tensão contínua em alternada (Fig. 2.6).

Esta configuração permite actuar sobre a amplitude e a frequência da tensão de alimentação do motor, controlando-se assim a sua velocidade angular e o seu binário. Para além do controlo de velocidade, os VEVs podem ter outras vantagens, tais como: uma maior protecção térmica do motor e a possibilidade de arranques e paragens suaves.

Aplicações dos VEVs

Como foi já referido, as aplicações com maior potencial para conservação de energia são aquelas que utilizam bombas, ventiladores e compressores. Normalmente, os motores eléctricos que transmitem força motriz a estes equipamentos têm potências fixas reguladas para o caudal nominal de fluido pretendido.

No entanto, na maioria das aplicações, os caudais de fluido precisam de ser reguláveis ao longo dos processos de utilização e, para tal, utilizam-se normalmente dispositivos de estrangulamento, p.ex., válvulas reguladoras de pressão ou caudal, *dampers* e outros acessórios similares. Estes dispositivos de estrangulamento cumprem normalmente as funções desejadas, mas fazem-no à custa da introdução de perdas de carga consideráveis no sistema, desperdiçando grandes quantidades de energia.

Nos tópicos seguintes (2.1.1.3 - 2.1.1.5) será dada especial atenção à aplicação de VEVs a sistemas específicos em que estas questões serão abordadas com maior detalhe.
Em suma, as principais vantagens resultantes da aplicação dos VEVs a motores eléctricos na indústria são:

- Economias de energia até 50 % ou mais, com um valor médio de 20 - 25 %;
- Redução dos picos de potência durante o arranque e a paragem do motor;
- Aumento da duração do motor;
- Aumento do factor de potência (ver definição no tópico 2.1.4.8), correspondendo a uma diminuição da parcela da energia reactiva na factura energética;
- Possibilidade de *by-pass* em caso de falha;
- Amplas gamas de velocidade, binário e potência;
- Melhorias no controlo do processo, na qualidade do produto, e em última análise, na produtividade;
- Diminuição da quantidade de partes mecânicas, dado o carácter compacto dos VEVs e estes incorporarem já diversos tipos de protecções para o motor (contra curto-circuitos, sobreintensidades, falta de fase, *etc.*) que deixam assim de ser adquiridas isoladamente.

Análise económica da instalação e utilização de um VEV

Desde há algum tempo que os variadores electrónicos de velocidade (VEVs) se têm tornado mais atractivos do ponto de vista económico. A melhoria do desempenho e fiabilidade dos VEVs fornece maiores economias energéticas e acelera a amortização dos investimentos associados à sua instalação e utilização, diminuindo o *payback*. De facto, devido à sua flexibilidade, alto rendimento, elevada fiabilidade e custo decrescente, os VEVs têm vindo a aumentar significativamente a sua penetração no mercado. A Fig. 2.7 apresenta a estrutura do mercado europeu de VEVs representativa do período compreendido entre 1998 e 2002.
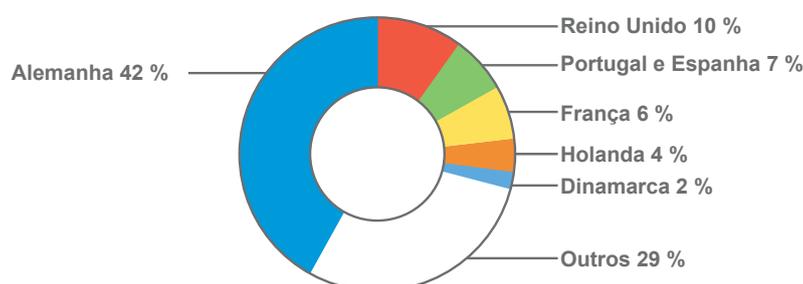
Fig. 2.7/ Distribuição do mercado europeu de VEVs em termos de unidades vendidas. Período de referência: 1998-2002. Figura adaptada de [25].

A rentabilidade dos VEVs depende da potência do motor a controlar e do tipo de aplicação. No entanto, existem outros factores importantes, como o número de horas de funcionamento e o regime de carga do motor. Em relação a este último factor, quanto mais variável for o regime de carga, maior será o potencial de economia de energia.

Sempre que se queira investigar a viabilidade económica da instalação de um VEV num determinado motor de indução, é importante entrar em linha de conta com a redução global do rendimento. Se por um lado o controlo da velocidade pode permitir economias de energia bastante significativas em determinados regimes de carga, o facto de tal ser conseguido através de um dispositivo que introduz perdas adicionais, pode levar a poupanças negativas noutros regimes de carga. De facto a redução económica dos VEVs decresce para potências mais baixas.
Assim, considerando a existência de *i* regimes de carga, a economia anual total resultante da implementação de um VEV num motor eléctrico inicialmente sem controlo de velocidade, é dada pela seguinte equação:

$$Economia\ anual\ (€/a) = \sum_i \left[t_i C_{el,i} \left(\frac{P_{M,i}}{\eta_{M,i}} - \frac{P_{VEV-M,i}}{\eta_{VEV-M,i}} \right) \right] \quad \text{(Eq. 3)}$$

onde:
i - índice correspondente ao regime de carga;
t_i - número de horas de funcionamento do motor no regime de carga i (h/a);
$C_{el,i}$ - custo médio da electricidade durante o período t_i (€/kW.h)
$P_{M,i}$ - potência útil mecânica do motor no regime de carga i (kW);
$\eta_{M,i}$ - rendimento do motor no regime de carga i (fracção);
$P_{VEV-M,i}$ - potência útil mecânica do motor com VEV no regime de carga i (kW);
$\eta_{VEV-M,i}$ - rendimento do motor com VEV no regime de carga i (fracção).

2.1.1.3 Sistemas de bombagem

Os sistemas de bombagem são muito importantes a nível industrial, representando aproximadamente 16 % do consumo energético da Indústria Portuguesa [31]. Por exemplo, na indústria química estes sistemas usam 37 a 76 % de toda a energia gasta em motores eléctricos [24]. O consumo energético representa cerca de 85 % dos custos totais associados a um sistema de bombagem (ver Fig. 2.8).
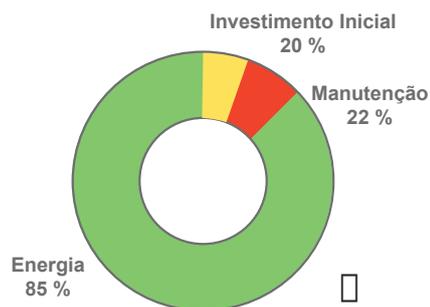
Fig. 2.8/ Custos típicos associados a um sistema de bombagem ao longo da sua vida útil.

Um sistema de bombagem é tipicamente constituído por cinco componentes:

- Bomba;
- Equipamento de accionamento da bomba (geralmente um motor eléctrico que junto com a bomba forma o grupo electrobomba);
- Válvulas;
- Tubagem;
- Equipamentos de uso final (tanques, permutadores de calor, *etc*.).

A importância dos sistemas de bombagem na indústria deve-se essencialmente ao seu número. De facto, como muitas unidades industriais têm centenas ou até milhares destes sistemas, o primeiro passo para aumentar a eficiência energética envolve a identificação dos sistemas que têm maiores perdas, tornando-os alvo de planos de optimização.
Estes planos devem seguir os passos seguintes [24]:

1. Avaliar todos os sistemas de bombagem e identificar aqueles que necessitam de ser rapidamente melhorados;
2. Analisar detalhadamente os sistemas identificados;
3. Desligar bombas desnecessárias ou usar interruptores de pressão de modo a controlar o número de bombas em funcionamento;
4. Repor as folgas internas da bomba;
5. Substituir ou modificar as bombas sobredimensionadas;
6. Instalar VEVs ou usar arranjos com múltiplas bombas (p. ex., várias bombas em paralelo) para garantir uma variação do caudal sem recorrer ao uso de um dispositivo de estrangulamento (válvula reguladora de caudal);
7. Substituir os motores eléctricos convencionais por motores de alta eficiência;
8. Reparar fugas e válvulas deficientes (ou substituir estas por válvulas mais eficientes) e eventualmente conservar ou modificar os impulsores das bombas;
9. Estabelecer um programa de manutenção periódico.

De acordo com esta metodologia de optimização é possível, para além de outros resultados práticos, identificar problemas operacionais e atribuir soluções-tipo que sejam as mais ajustadas. Nas tabelas seguintes, e como potencial guia para os técnicos que acompanham de forma mais directa estas questões, listam-se alguns dos problemas mais frequentes e um conjunto de medidas a implementar de modo a ultrapassar de forma eficiente esses problemas.

Tabela 2.4/ Lista dos principais problemas associados à selecção/dimensionamento e manutenção de bombas, e lista de medidas a implementar para solucionar esses problemas.

Selecção/ Dimensionamento e Manutenção de Bombas
Problemas
Excessiva manutenção da bomba. Este problema pode indicar: a) bomba em cavitação; b) bomba envelhecida, i.e., com forte desgaste; c) bomba não adequada à operação em causa.
Excesso de estrangulamento na descarga. Uma bomba estrangulada na sucção, com carga e caudal constantes, significa um excesso de capacidade. O desperdício energético associado ao estrangulamento é proporcional à queda de pressão através da válvula de controlo e ao caudal.
Uma bomba com ruído geralmente indica a existência de cavitação. As válvulas de controlo ou de desvio de caudal (*bypass*) que provocam ruído indicam, frequentemente, a existência duma queda exagerada de pressão.
Alterações das condições de projecto. Modificações nas condições de operação da instalação (ampliações, paragens, etc.) podem levar a situações em que bombas anteriormente bem aplicadas passam a operar com eficiência reduzida.
Bombas com sobredimensionamento desadequado. O sobredimensionamento exagerado provoca desperdício de energia porque um maior caudal é bombeado a uma pressão superior à exigida.
Medidas / Soluções
Substituir bombas sobredimensionadas. As bombas sobredimensionadas são a maior fonte individual de desperdício de energia em sistemas de bombagem. A sua substituição deve ser sempre avaliada em relação a outros métodos possíveis para reduzir a capacidade (p.ex., mudança de impulsores e uso de VEVs para o controlo de variação de velocidade.
Utilizar uma pequena bomba auxiliar de aumento de pressão (*booster*). As necessidades energéticas do sistema global podem ser reduzidas através do uso de uma bomba auxiliar que garanta um escoamento a alta pressão para um determinado utilizador e que permita ao resto do sistema funcionar a uma pressão mais baixa e a uma potência reduzida.
Limpar ou modificar o diâmetro dos impulsores. Para corrigir o sobredimensionamento de bombas, a carga na sucção pode ser reduzida 10 a 50 % através da limpeza ou alteração do diâmetro do impulsor da bomba segundo as recomendações indicadas pelo fabricante. A alteração do diâmetro do impulsor para aumentar o rendimento do motor eléctrico deve ser analisada caso a caso, tendo em atenção que esta alteração pode reduzir fortemente o rendimento hidráulico da bomba.
Repor as folgas internas. A capacidade e o rendimento da bomba diminuem à medida que as fugas internas aumentam devido a folgas excessivas entre componentes desgastados da bomba, p.ex., voluta, impulsor, casquilhos da garganta, anéis, manga de chumaceiras. Esta medida deverá ser executada se o desempenho se alterar significativamente.
Aplicar revestimentos na bomba. A aplicação de revestimentos na bomba, particularmente na voluta, reduzirá as perdas por atrito.

Tabela 2.5/ Lista dos principais problemas associados ao controlo de sistemas de bombagem e lista de medidas a implementar para solucionar esses problemas.

Controlo
Problemas
Bombas com grandes variações de caudal ou pressão. Quando os escoamentos ou pressões normais são menores que 75 % dos seus valores máximos, está a ser desperdiçada energia. Este desperdício energético deve-se normalmente a um estrangulamento excessivo, a grandes caudais de desvio (*by-pass*) ou ao funcionamento de bombas desnecessárias.
O desvio caudal por *by-pass*, quer através de sistemas de controlo ou de orifícios de protecção de perdas de pressão, constitui um desperdício de energia.
Nos sistemas com múltiplas bombas, a energia é habitualmente desperdiçada por *by-pass* do caudal em excesso, operação de bombas desnecessárias, excesso de pressão, ou por existir um grande aumento de caudal entre bombas.
Medidas / Soluções
Desligar bombas desnecessárias. Esta medida óbvia, mas frequentemente negligenciada, pode ser realizada após uma redução significativa das necessidades da instalação a alimentar. Se são utilizadas bombas sobredimensionadas porque as necessidades de caudal variam, o número de bombas em funcionamento pode ser automaticamente controlado através da instalação de sensores de pressão numa ou mais bombas.
Utilizar variadores eléctronicos de velocidade nos motores eléctricos das electrobombas. Os VEVs proporcionam as economias máximas ao ajustarem a velocidade da bomba em função dos requisitos de caudal do sistema, tornando desnecessária a utilização de válvulas estranguladoras de caudal. No entanto, a instalação de VEVs implica um maior custo de investimento comparativamente com outros métodos de controlo da capacidade.
Se o uso de VEVs for desaconselhável, optimizar o estrangulamento do caudal na descarga. Embora o controlo de uma bomba centrífuga por estrangulamento conduza a um desperdício energia, este desperdício é geralmente menor do que os observáveis com a bombagem sem controlo ou com controlo por *by-pass*. Assim, em relação a casos extremos, o estrangulamento pode representar uma forma de economizar energia.
Utilizar várias bombas em paralelo para funcionamento de acordo com as necessidades. A utilização de várias bombas em paralelo oferece uma alternativa ao controlo por *by-pass*, ao controlo por estrangulamento ou aos VEVs. Quando os sistemas com múltiplas bombas funcionam a baixo caudal, esta medida aumenta a economia energética porque permite desligar uma ou mais bombas enquanto as restantes funcionam com um rendimento elevado.
Instalar contadores volumétricos e eléctricos para monitorizar o desempenho do sistema. Com base em medições periódicas, deve ser feito um registo regular dos indicadores de desempenho do sistema. Este registo regular deve acompanhar adequadamente o funcionamento do sistema e, se necessário, deve ser usado como informação de base para futuras melhorias no controlo.

A eficiência total de um sistema de bombagem depende da eficiência dos vários componentes do sistema. Como se pode ver no exemplo da Fig. 2.9, para a mesma potência de saída, o sistema ineficiente absorve mais do dobro da potência absorvida pelo sistema optimizado, realçando a importância da concepção de sistemas motorizados integrados [25].
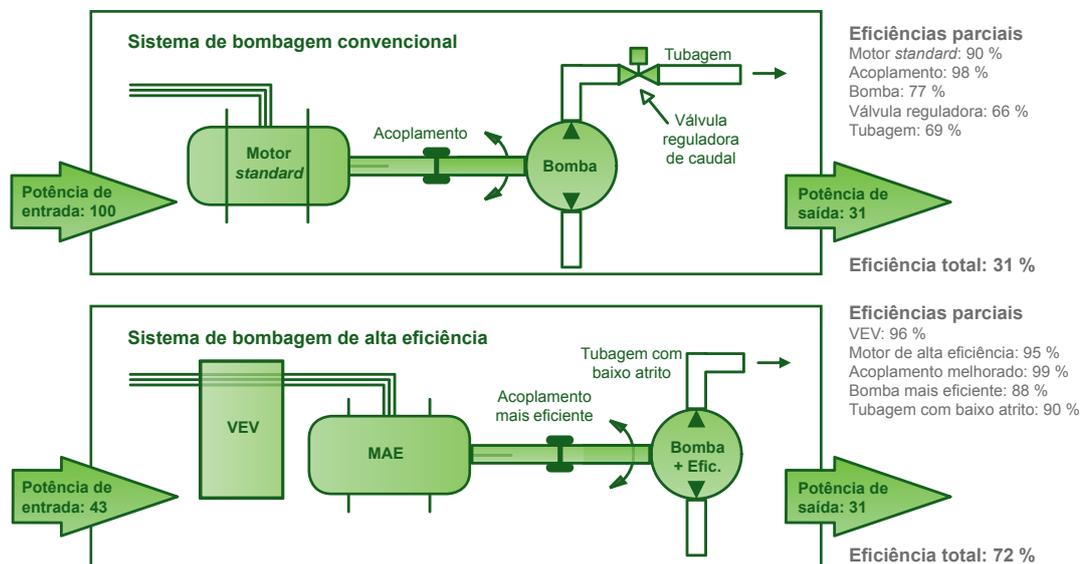
Fig. 2.9/ Comparação de um sistema de bombagem convencional com um sistema de bombagem de alta eficiência possuindo um VEV. Ambos os sistemas debitam a mesma potência de saída. Figura adaptada de [25].

De acordo com o exemplo da Fig. 2.9, duas das principais medidas que transformam sistemas convencionais em sistemas de bombagem de alta eficiência são: a aplicação de VEVs que permitem variar a velocidade de rotação dos motores eléctricos e a substituição de bombas convencionais por bombas mais eficientes.

Note-se que, apesar da inexistência de um esquema de rotulagem de eficiência para bombas (similar ao esquema CEMEP-CE para motores eléctricos), existem grandes diferenças de rendimento hidráulico (eficiência) entre as bombas convencionais e as bombas de alto rendimento disponíveis comercialmente. Em algumas circunstâncias, esta diferença de rendimento hidráulico pode mesmo ultrapassar os 10 %. Note-se que o exemplo da Fig. 2.9 mostra uma diferença de 11 % entre os rendimentos hidráulicos de uma bomba convencional (77 %) e de uma bomba de alto rendimento (88 %).

Independentemente do tipo e número de medidas que seja necessário implementar, a medida que, à partida, possibilita as maiores oportunidades de poupança energética é aquela que, através da aplicação de VEVs, converte os grupos electrobomba de velocidade constante em grupos electrobomba de velocidade variável.

Devido à sua importância, e com o intuito de poder dar um contributo mais especializado aos técnicos cuja actividade está mais ligada a estas questões, apresenta-se o tópico seguinte em que é dada especial atenção a esta medida.

Conversão de grupos electrobomba de velocidade constante em grupos electrobomba de velocidade variável através da aplicação de VEVs

Em alguns sistemas de bombagem podem ser alcançadas economias de energia acima de 50 % simplesmente com a aplicação de variadores electrónicos de velocidade nos motores eléctricos das electrobombas. Tendo em conta que actualmente cerca de 80 % das electrobombas aplicadas em todo o mundo são unidades de velocidade constante, o potencial de poupança de energia desta medida tem um valor extremamente elevado.
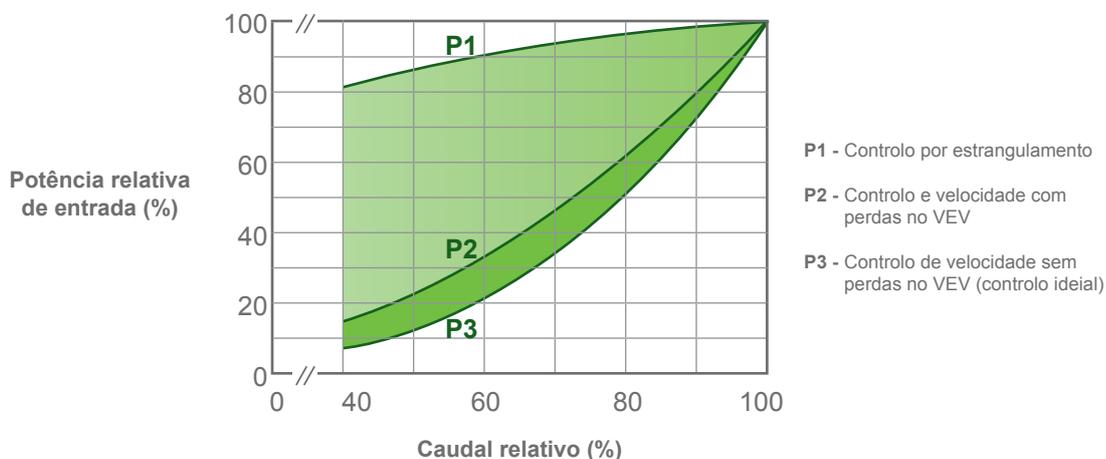
Fig. 2.10/ Potências relativas de entrada para vários métodos de controlo do caudal de uma bomba centrífuga.

A Fig. 2.10 apresenta a variação de potência eléctrica necessária para controlar o caudal de uma bomba. Usando uma válvula convencional (controlo por estrangulamento), verifica-se que reduzindo o caudal, a potência absorvida pouco decresce. Se, pelo contrário, a redução do caudal é conseguida através da redução de velocidade da bomba, então a potência absorvida decresce fortemente. Assim, a Fig. 2.10 apresenta de forma gráfica a potencial redução energética decorrente da aplicação do controlo de velocidade através de um VEV.

É ainda de salientar que, no caso das bombas, existe uma relação do tipo aproximadamente cúbico entre a velocidade de rotação e a potência mecânica absorvida, enquanto o caudal é aproximadamente proporcional à velocidade de rotação. Destas relações, infere-se que reduzindo, por exemplo, o caudal em 20 %, o consumo de energia eléctrica pode ser reduzido para metade.

A Fig. 2.11 também permite visualizar a comparação entre regimes de regulação de caudal por estrangulamento e por velocidade regulável da bomba. A gama referida de variação de caudal situa-se entre Q1 e Q2. Para uma velocidade constante da bomba, N1, a válvula de estrangulamento fará deslocar o ponto de funcionamento entre A e B. Se a velocidade variar entre N1 e N2, o ponto de funcionamento deslocar-se-á entre B e C para as mesmas variações de caudal. Não só esta linha corresponde a um conjunto de pontos de maior rendimento como também corresponde a produtos menores de H por Q e, portanto, a um menor consumo de energia.
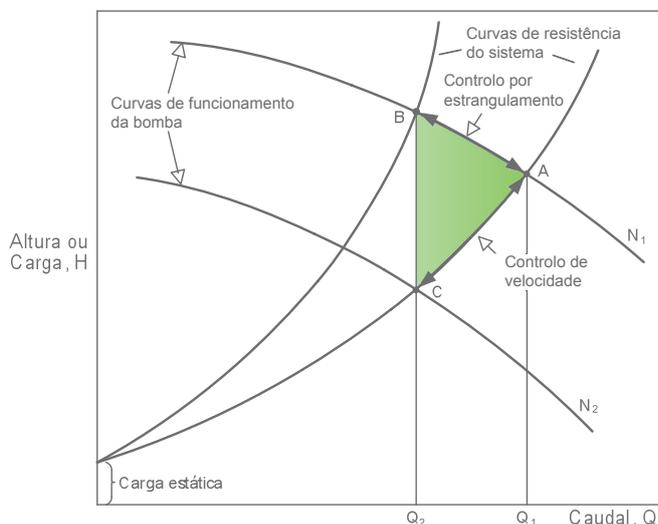
Fig. 2.11/ Comparação entre o controlo de caudal por estrangulamento e o controlo de caudal por variação da velocidade de rotação da bomba (através de um VEV).

Refira-se ainda que em muitas aplicações de bombagem, onde são utilizadas várias bombas em paralelo para produzir o caudal requerido, a substituição do tradicional ciclo *on/off* pela operação contínua de todas as bombas com velocidade variável (através da utilização de VEVs) leva a economias de energia eléctrica significativas [25]. Esta situação encontra-se exemplificada na Fig. 2.12 e é especialmente indicada para sistemas onde a altura manométrica a vencer não é um factor importante.

Outras vantagens da operação contínua com variação de velocidade são [25]:

- Eliminação dos arranques bruscos típicos dos ciclos *on/off*;
- Controlo do efeito de "golpe de aríete" que degrada as tubagens, através de acelerações e desacelerações controladas.
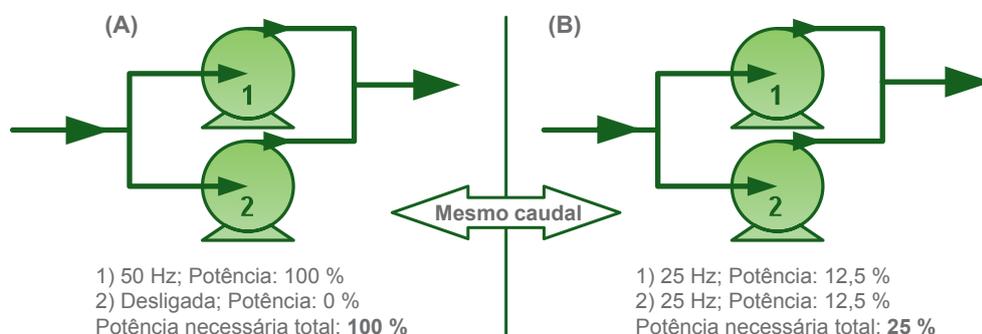
Fig. 2.12/ Dois modos de operação diferentes em que as mesmas bombas em paralelo debitam um caudal total igual. Caso A: bombas a operarem em ciclos *on/off*; e caso B: bombas com variação de velocidade (VEV acoplado). Figura adaptada de [25].

2.1.1.4 Sistemas de ventilação

A principal função de um ventilador é movimentar grandes volumes de ar ou gases a pressões que sejam suficientes para suplantar a resistência dos sistemas aos quais estão agregados. Para reduzir a energia utilizada em ventiladores é necessário ter uma compreensão básica de como os sistemas de ventilação funcionam.

Os principais factores e considerações a ter em conta para garantir que um sistema de ventilação é eficiente em termos de desempenho e consumo de energia são:
- Seleccionar o tipo adequado de motor para o ventilador;
- Determinar a velocidade do ar como parte do projecto de dimensionamento;
- Minimizar a perda de pressão através da tubagem de distribuição;
- Seleccionar o ventilador mais adequado para a aplicação particular em questão;
- Efectuar uma instalação correcta;
- Efectuar uma manutenção regular;
- Efectuar uma revisão anual.

No que concerne aos motores eléctricos dos ventiladores, devem ser aplicadas o mesmo tipo de medidas de economia energética já referidas no tópico 2.1.1.2.

Tal como nos sistemas de bombagem, a instalação de VEVs em sistemas de ventilação é a medida que, à partida, leva a maiores reduções energéticas (mesmo em motores já a operar perto da sua carga óptima). Nos sistemas convencionais são gastas grandes quantidades de energia sempre que se utilizam válvulas ou dispositivos similares para regular o caudal de ar.

A Fig. 2.13 apresenta o exemplo de um *chiller* onde a instalação de VEVs permite controlar a velocidade da bomba e a velocidade do ventilador, com base na temperatura ambiente e na temperatura de saída do fluido refrigerante, respectivamente. O resultado é que comparativamente com a operação baseada em ciclos *on/off*; este sistema não só permite um controlo mais estável da temperatura do espaço refrigerado como também leva a poupanças de electricidade que tipicamente atingem os 25 - 50 % [25].
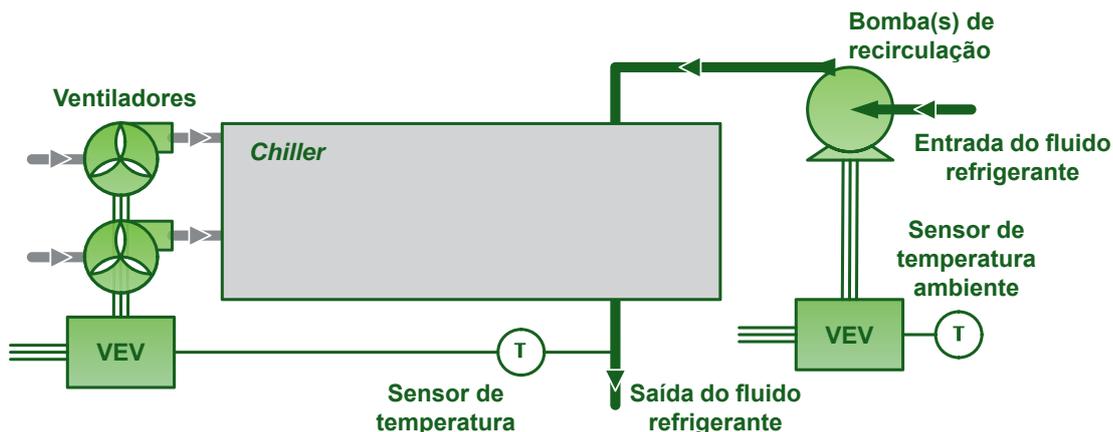
Fig. 2.13/ Exemplo da aplicação de VEVs a um sistema de ventilação: chiller com ventiladores e com a bomba de recirculação de fluido refrigerante acoplados a VEVs. Figura adaptada de [25].

2.1.1.5 Sistemas de compressão de ar

O ar comprimido é uma forma versátil, flexível e segura de transmitir energia. Quase todas as instalações industriais a utilizam. De facto, mais de 10 % da energia eléctrica consumida numa indústria é utilizada em ar comprimido. Contudo, perto de 20 % desta energia é perdida devido a fugas de ar, à má utilização do ar comprimido ou à negligência da manutenção. Para além das medidas de economia de energia relacionadas com os sistemas de força motriz, a optimização energética dos sistemas de ar comprimido deverá passar por intervenções nas seguintes áreas principais:

- Produção e tratamento do ar comprimido;
- Redes de distribuição de ar comprimido;
- Dispositivos de utilização final;
- Projecto e operação do sistema global.

Em termos mais específicos e relativamente às três primeiras áreas, as principais medidas a considerar com vista ao aumento da eficiência energética dos sistemas de ar comprimido são apresentadas na seguinte listagem:

<u>Produção de ar comprimido</u>

- Optimização da utilização do sistema: ajuste dos controlos e regulação da pressão, desligar quando não utilizado;
- Optimização do nível de pressão do ar comprimido do sistema em função as necessidades dos dispositivos de utilização final;
- Redução da temperatura do ar de admissão, mantendo uma óptima filtragem na tomada de ar;
- Melhoramento do sistema de controlo do compressor;
- Optimização das mudanças de filtros (em função da queda de pressão);
- Filtração e secagem do ar até aos requisitos mínimos do sistema (possivelmente mediante instalação de filtros/secadores pontuais para necessidades específicas);

- Recuperação e utilização do calor desperdiçado através dos sistemas de arrefecimento dos compressores;
- Aumento da capacidade do reservatório principal de ar comprimido;
- Utilização de variadores electrónicos de velocidade;
- Possível utilização de um sistema de múltiplas pressões, com a utilização de sobrepressores (*boosters* para aumentar a pressão em determinados locais;
- Substituição dos motores eléctricos convencionais avariados ou em fim de vida por motores de alto rendimento;
- Substituição de compressores exageradamente sobredimensionados por outros com menores consumos específicos de energia e ajustados às necessidades do sistema;

<u>Rede de distribuição de ar comprimido</u>

- Instituição de um programa regular para a verificação de fugas de ar comprimido;
- Redução de fugas com a utilização de adaptadores de fugas reduzidas, uniões rápidas de elevada qualidade, *etc.* ;
- Divisão do sistema em zonas, com reguladores de pressão apropriados ou válvulas de corte. Fecho de linhas que estão fora de serviço;
- Utilização de purgas de condensados do tipo “sem perdas de ar”;
- Dimensionar adequadamente as capacidades de armazenamento (permitindo que os compressores funcionem com um rendimento optimizado e evitando arranques e paragens bruscas);
- Instalação de reservatórios suplementares de ar comprimido próximos de cargas variáveis;
- Diminuir a extensão da rede e criar rede em anel;
- Optimizar o diâmetro da tubagem;
- Limitar o número de cotovelos, de mudanças de direcção e de mudanças de secção.

<u>Dispositivos de utilização final</u>

- Eliminação de utilizações não apropriadas de ar comprimido;
- Reparação ou substituição de equipamentos com fugas de ar comprimido;
- Desligar o ar comprimido quando o dispositivo não está em operação;
- Verificação (e optimização) da necessidade de dispositivos específicos de regulação de pressão, filtros e secadores;
- Para limpeza, usar preferencialmente aspiradores eléctricos. Estes consomem menos energia que os aparelhos insufladores de ar (bicos de sopro ou pistolas de ar).

A avaliação de cada uma das medidas acabadas de referenciar deverá ter em conta a respectiva aplicabilidade e rentabilidade, tendo em conta não apenas o custo do investimento necessário e as economias de energia anuais, mas também outras eventuais alterações nos custos anuais de operação e manutenção do(s) sistema(s) de ar comprimido em questão. Qualquer uma das medidas/soluções energeticamente eficientes passíveis de implementação deverão igualmente permitir a manutenção ou melhoria da fiabilidade e da qualidade do serviço do(s) sistema(s) em causa.

Em termos energéticos, o rendimento global de um sistema de ar comprimido depende dos rendimentos individuais dos vários componentes que o compõem e das interdependências existentes entre esses componentes. O potencial global de economia de energia associado a um sistema de ar comprimido é, normalmente, em média, da ordem dos 30 %, ainda que cada medida possa conduzir a economias distintas e variáveis de instalação para instalação.

Obviamente cada instalação é um caso, mas todas as medidas passíveis de implementação referidas anteriormente são exequíveis tecnicamente e viáveis sob o ponto de vista económico (com tempos de retorno do investimento inferiores a 3 anos) para um conjunto variado de aplicações. No entanto, de entre todas as medidas referenciadas, as mais importantes são:

- Redução de fugas de ar comprimido;
- Melhor concepção do sistema;
- Utilização de variadores electrónicos de velocidade (VEVs);
- Recuperação de calor.

A tabela seguinte resume a contribuição potencial, em termos de economias de energia, de algumas das principais medidas técnicas referenciadas [32].

Tabela 2.6/ Valores típicos de economia de energia associados a várias medidas. Tabela retirada e adaptada de [32].

Medidas de economia de energia	% de aplicação (1)	% de economia (2)	Contribuição potencial (%) (3)
Instalação ou renovação do sistema			
Melhoria dos accionamentos (substituição de motores convencionais por motores de alto rendimento).	25	2	0,5
Utilização de variadores electrónicos de velocidade.	25	15	3,8
Melhoria do compressor.	30	7	2,1
Utilização de sistemas de controlo sofisticados e precisos.	20	12	2,4
Recuperação de calor para outras utilizações.	20	20	4,0
Melhoria dos sistemas de arrefecimento, secagem e filtragem.	10	5	0,5
Concepção geral do sistema, incluindo sistemas de multipressão.	50	9	4,5
Redução de perdas de carga.	50	3	1,5
Optimização de dispositivos de utilização final, consumidores de ar comprimido.	5	40	2,0
Operação e manutenção do sistema			
Redução de fugas de ar comprimido.	80	20	16,0
Maior frequência na substituição de filtros.	40	2	0,8
		TOTAL	**38,1**

Legenda:
(1) % de sistemas em que a medida é aplicável e viável economicamente
(2) % de economia do consumo energético anual.
(3) Contribuição potencial (%) = Aplicação (%) x Economia (%)

As economias de energia são mais facilmente conseguidas a partir de uma correcta concepção (na fase de projecto) dos sistemas e, portanto, aquando da instalação de um sistema novo. No entanto, também são possíveis economias significativas aquando da substituição dos principais componentes dum sistema já existente. Além disso, acções relacionadas com a operação e manutenção, nomeadamente a manutenção regular de filtros e a detecção de fugas de ar comprimido, podem ser introduzidas em qualquer momento do ciclo de vida de um sistema de ar comprimido [32].

De seguida são apresentados dados mais detalhados sobre algumas das medidas / soluções tecnológicas referenciadas anteriormente, cuja aplicação a sistemas de ar comprimido pode, em muitos casos, levar a reduções energéticas consideráveis.

Optimização da pressão do ar comprimido

Na indústria é prática corrente produzir ar comprimido a pressão elevada e depois expandi-lo até à pressão desejada, com grandes perdas neste procedimento. A solução mais energeticamente favorável é a produção de ar comprimido à pressão mínima requerida (p.ex., a redução de pressão do compressor de 8,2 bar para 6,9 bar permite ganhos energéticos de 9,1 % na potência de compressão).

Como regra de base, pode afirmar-se que para uma redução de 1 bar na pressão de trabalho da rede, a redução em energia eléctrica associada pode atingir os 6 %. Estas economias energéticas são conseguidas com a ajuda de sistemas de controlo apropriados, p.ex., controladores baseados em computadores industriais.

A utilização de controladores baseados em computadores industriais é frequente em sistemas modernos de produção e tratamento de ar comprimido. Estes sistemas podem ser utilizados apenas no controlo do compressor ou no controlo global dum sistema completo de ar comprimido. Com tais sistemas de controlo, a pressão máxima de trabalho pode ser reduzida, os compressores são melhor utilizados, as perdas de potência são significativamente reduzidas, é conseguido um controlo efectivo dos custos e a análise dos mesmos pode ser feita com uma pressão constante.

Em vez de se utilizar um controlo em cascata, os sistemas modernos, ao efectuarem um controlo de banda de pressão, podem controlar até 16 compressores com uma variação de pressão de ±0,1 bar. No passado, o controlo de sistemas de ar comprimido necessitava de uma diferença de pressão de 3 ou 4 bar, o que resultava numa pressão de trabalho significativamente alta.

A simples redução da pressão do sistema através de controladores modernos também tem outra vantagem: a diminuição das perdas causadas por fugas no sistema de distribuição do ar comprimido, sem que tal esteja associado a qualquer reparação.

Recuperação e utilização do calor desperdiçado produzido pelos compressores

Em operação, os compressores geram calor, o qual pode, em muitas circunstâncias, ser recuperado e utilizado noutras aplicações. Dado que este calor se encontra disponível de uma forma “gratuita” e que os sistemas de recuperação de calor disponíveis hoje em dia são diversos, o potencial de recuperação desta energia térmica e a escolha do sistema de recuperação dependem dos seguintes factores:

- Tipo de compressor: blindado ou não, alternativo ou de parafuso, volumétrico ou dinâmico;
- Tipo, caudal e temperatura do fluido de arrefecimento do compressor (água, ar ou óleo);
- Existência, a curta distância e no mesmo instante, de áreas a aquecer, caldeiras ou outros equipamentos consumidores de energia térmica;
- Tempo de funcionamento e factor de carga do compressor.

Os sistemas clássicos de recuperação baseiam-se essencialmente no aquecimento de ambientes confinados próximos, através de condutas de ar quente (proveniente do arrefecimento do compressor) e, eventualmente, recorrendo a ventiladores de baixa pressão para compensar o aumento das perdas de carga adicionais introduzidas pelas condutas. As vantagens destas instalações residem na sua simplicidade e baixo custo, mas não permitem a acumulação da energia recuperada e têm carácter sazonal.

Actualmente, existem novos sistemas de recuperação de calor que fornecem água quente a temperaturas de 80 - 90 ºC e que se encontram disponíveis tanto em compressores de parafuso com injecção de óleo, como em compressores arrefecidos por água. Nos primeiros, o óleo de arrefecimento é desviado, total ou parcialmente, do radiador normal para passar num permutador óleo/água que aquece a água até dois níveis térmicos à escolha, situados próximo dos 70 ou 80 ºC. Cerca de 94 % da energia eléctrica consumida por este tipo de compressores pode assim ser recuperada e usada como fonte de aquecimento. Quanto aos compressores de parafuso isentos de óleo e arrefecidos por água em circuito fechado, estes permitem o fornecimento de água quente entre 90 e 95 ºC, recuperando-se entre 85 e 90 % da energia consumida no seu accionamento.

A recuperação do calor produzido pelos compressores é uma operação cuja viabilidade económica depende do custo e disponibilidade do equipamento necessário (permutadores de calor, tubagens, reguladores, *backup* de fonte de calor, *etc.*) e da comparação com soluções alternativas [32].

Utilização de variadores electrónicos de velocidade

O modo de funcionamento em carga-vazio não tira partido da operação em modo contínuo dos compressores. A utilização de VEVs ajusta a velocidade do compressor em função das exigências de pressão do sistema em determinado momento, permitindo inclusivamente desligar o compressor nas ocasiões em que este não está a ser utilizado.

A integração de VEVs em sistemas de ar comprimido pode revelar-se bastante viável sob o ponto de vista económico em situações de carga variável, o que acontece em cerca de um quarto das instalações existentes. Ainda assim, é natural que a instalação de VEVs se limite à venda de novos compressores, já que a adaptação de compressores já instalados coloca normalmente vários problemas técnicos [32].

A Fig. 2.14 apresenta um exemplo da aplicação desta tecnologia em sistemas de compressão. Entre as vantagens da utilização de VEVs encontram-se [11]:

- Redução de fugas (diminuição nas oscilações bruscas de pressão associadas ao modo de funcionamento em carga/vazio);
- Maior durabilidade do compressor.
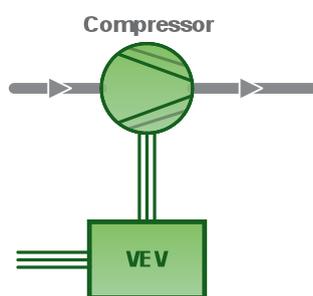
Fig. 2.14/ Exemplo da aplicação de um VEV a um compressor de ar. Figura adaptada de [25].

No caso de instalações de multicompressores, o VEV deverá ser integrado apenas num dos compressores, e preferencialmente ligado a algum sistema de controlo sofisticado que não só varie a velocidade do compressor, como também permita arrancar/parar os restantes compressores de velocidade constante, ajustando dessa forma o caudal às necessidades do sistema [32].

Melhoramento do sistema de controlo de funcionamento em carga/vazio

No sistema de controlo funcionamento em carga/vazio, um compressor pode passar bastante tempo em vazio, estando em funcionamento sem gerar pressão útil para o sistema. Há que ter presente que um compressor a funcionar em vazio, embora dependendo do tipo de compressor e do sistema de accionamento, poderá consumir cerca de 20 % da energia a plena carga. Nestes casos, a optimização passa pela utilização de compressores pouco sobredimensionados, ou por uma série de compressores mais pequenos de modo a que seja possível desligar alguns quando as necessidades energéticas são menores.

De facto, para a optimização do controlo de funcionamento em carga/vazio, a selecção adequada dos compressores é a questão mais importante. As centrais de ar comprimido modernas não são constituídas por compressores de igual capacidade; a utilização de compressores de diferentes capacidades, uns para trabalho em carga e outros para trabalho em picos, tem vindo a demonstrar maior eficiência.

Para além disso, o outro factor crucial para um funcionamento em carga/vazio eficiente é a existência de uma correcta coordenação (controlo) do sistema. As centrais de produção e tratamento de ar comprimido modernas e adequadamente projectadas trabalham com 1 - 2 % de energia para controlo.

Esta economia energética no controlo está relacionada com a utilização de sistemas de controlo sofisticados que ajustam a produção do compressor com as necessidades de processo. Estes sistemas de controlo podem ser usados em conjunto com os VEVs, reduzindo o consumo de energia através da optimização das transições entre os estados de carga, vazio e paragem do compressor.

Redução de fugas de ar comprimido

As fugas de ar comprimido podem representar 15 - 20 % do custo total de produção de ar comprimido. Uma manutenção eficiente e inspecções periódicas permitem reduzir este valor para 5 - 10 %.

De todas as medidas conducentes a poupanças energéticas, a redução de fugas de ar comprimido é, de longe, a medida mais importante, sendo aplicável a quase todos os sistemas de ar comprimido.
A maior parte dos utilizadores de ar comprimido é pouco sensível à importância de um programa regular de detecção de fugas, em parte porque as fugas são invisíveis e porque geralmente não provocam danos.

Uma rede de distribuição concebida e instalada correctamente pode diminuir significativamente as fugas de ar comprimido, por exemplo, através da utilização de dispositivos modernos de drenagem de condensados sem perdas de ar, ou através da especificação de ligações de elevada qualidade e duração. Contudo, o aspecto essencial relacionado com este tópico tem a ver com uma manutenção adequada. Existem no mercado aparelhos de uso manual que detectam as fugas de ar comprimido pelo ruído que estas provocam, permitindo a redução dos custos associados à detecção de fugas.

2.1.2 PRODUÇÃO COMBINADA DE ENERGIA MECÂNICA E ENERGIA TÉRMICA

2.1.2.1 Cogeração(3)

A cogeração é a produção sequencial e simultânea de energia térmica e de energia mecânica, que normalmente é usada para produzir electricidade, num sistema único integrado, a partir de uma fonte de energia primária. A cogeração pode ser usada na indústria, comércio ou serviços, mas para que uma unidade de cogeração seja viável, a eficiência de aproveitamento da energia primária deve ser superior à de uma central de ciclo combinado convencional.

(3) Vulgarmente conhecida como produção combinada de calor e electricidade.

Numa unidade de geração termoeléctrica, a queima de um combustível fóssil produz vapor a alta temperatura e pressão, que seguidamente é direccionado para uma turbina que gera energia mecânica e subsequentemente converte-a em energia eléctrica. A maioria das centrais termoeléctricas convencionais tem rendimentos inferiores a 40 %. Esta situação pode ser exemplificada esquematicamente pela Fig. 2.15. Numa central termoeléctrica de ciclo combinado de última geração, com tecnologias actuais e optimizadas, o aproveitamento da energia do combustível (primária) é no máximo de 55 a 60 % [37].
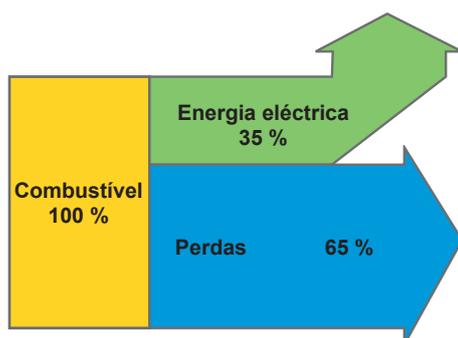
Fig. 2.15/ Rendimento típico de uma unidade convencional de geração de energia eléctrica.

Nas centrais termoeléctricas convencionais, a energia não aproveitada perde-se na sua maior parte através dos gases de combustão que saem pela chaminé, e perde-se também nas operações de condensação e arrefecimento do ciclo termodinâmico. A cogeração, através do aproveitamento de uma parte importante da energia térmica que normalmente é perdida nas unidades convencionais, aumenta a eficiência energética global do processo (ver Fig. 2.16).
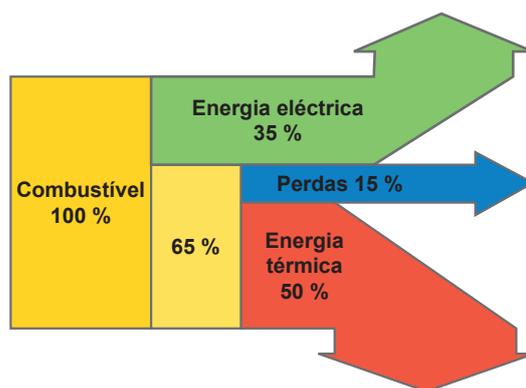
Fig. 2.16/ Rendimentos típicos da cogeração.

Quando se passa da geração separada de calor e electricidade para a cogeração, o aumento significativo da eficiência energética que se verifica conduz a uma diminuição do consumo de combustível (p.ex., petróleo, gás natural, carvão, biomassa) e a uma redução das emissões de gases poluentes. Ao contrário das técnicas tradicionais de controlo de poluição que actuam somente no tratamento dos gases de combustão, a cogeração reduz as emissões de gases poluentes através da prevenção, não afectando a produção de energia e a eficiência do processo [22].

Em teoria, quase todos os combustíveis são válidos para a cogeração. No entanto, os combustíveis fósseis predominam, em especial o gás natural por ser tecnologicamente mais fácil de aplicar e por ser menos nocivo para o ambiente. Também os resíduos sólidos, a biomassa e alguns gases industriais são importantes. No futuro, a biomassa e os gases industriais poderão ser mais usados se houver uma tecnologia mais apropriada e se esses combustíveis permitirem poupanças económicas. As unidades de cogeração podem ser concebidas de modo a que seja possível a utilização de diferentes tipos de combustível. Esta opção permite a escolha e utilização do combustível mais barato em cada momento.
Ao nível industrial, os principais benefícios da cogeração são os seguintes:

- Redução da factura energética;
- Possibilidade da unidade industrial ser energeticamente auto-suficiente;
- Possibilidade de venda de electricidade à rede de distribuição nacional caso a unidade de cogeração produza energia eléctrica excedentária;
- Redução dos custos de produção;
- Melhorias no fornecimento e distribuição da electricidade aos processos industriais.

A cogeração tem uma longa história em numerosas indústrias, particularmente na indústria química. Em anos mais recentes, o desenvolvimento crescente das tecnologias permitiu a transformação da cogeração numa tecnologia prática com uma grande diversidade de aplicações. De facto, a cogeração tem um forte potencial de aplicação não só no sector industrial, mas também no sector terciário, onde o calor pode ser usado para aquecimento ambiente de edifícios, entre outras aplicações.

Actualmente, existem unidades de cogeração preparadas para gerar energia com potências eléctricas que variam entre 1 kW e 500 MW durante um período mínimo de 20 anos. O projecto mais eficiente, do ponto de vista energético global, corresponde ao que satisfaz todas as exigências térmicas das instalações industriais. Se esta situação levar a um excesso de produção de energia eléctrica, este excesso pode ser injectado na rede eléctrica nacional. É importante saber quanta energia eléctrica e térmica requer a unidade industrial, porque é a relação entre elas que indica a tecnologia a escolher.

A cogeração não é uma tecnologia específica, mas antes a aplicação de várias tecnologias com o intuito de fornecer simultaneamente à unidade industrial a energia térmica, a energia mecânica e a energia eléctrica que ela necessita. Para este efeito, as tecnologias actualmente mais utilizadas em cogeração são: turbinas de vapor, turbinas de gás, ciclos combinados e motores de combustão interna. Estas e outras tecnologias mais recentes são apresentadas de seguida.

Cogeração com turbina de vapor

Numa unidade de cogeração com turbina de vapor (ver esquema da Fig. 2.17), a produção de energia eléctrica depende do nível de redução da pressão do vapor que passa através da turbina antes de este ser usado como fonte de energia térmica. Estas unidades são usadas principalmente em instalações onde as necessidades de energia térmica são pelo menos quatro vezes superiores às necessidades de energia eléctrica.

As turbinas de vapor foram as primeiras a ser usadas nos sistemas industriais de cogeração. As condições típicas do vapor de entrada na turbina são de 42 bar e 400 ºC ou de 63 bar e 480 ºC, enquanto a saída depende das condições de operação do sistema de turbinagem ou eventualmente das necessidades de energia térmica do processo.
Existem três tipos de turbinas de vapor:

Turbinas de contrapressão - em que o fluxo de vapor exausto que abandona a turbina é enviado directamente para o processo industrial em condições próximas das que são requeridas (derivando a designação “contrapressão” do facto do vapor ser rejeitado a pressões da ordem de grandeza da pressão atmosférica, portanto superiores ao vácuo do condensador);

Turbinas de condensação – em que o vapor após ser expandido na turbina é rejeitado (a baixa pressão) para um condensador de vácuo, onde se processa a condensação do vapor, sendo depois este condensado bombeado de novo para a caldeira para reinício do ciclo (Nota: Este tipo de turbina não é o mais adequado para sistemas de cogeração, dado o seu dimensionamento ser feito para optimizar o rendimento da conversão eléctrica);

Turbinas de extracção – são um misto dos dois tipos anteriores, permitindo que uma parte do vapor seja enviado para o processo industrial, a uma pressão intermédia, enquanto o remanescente é condensado no condensador.
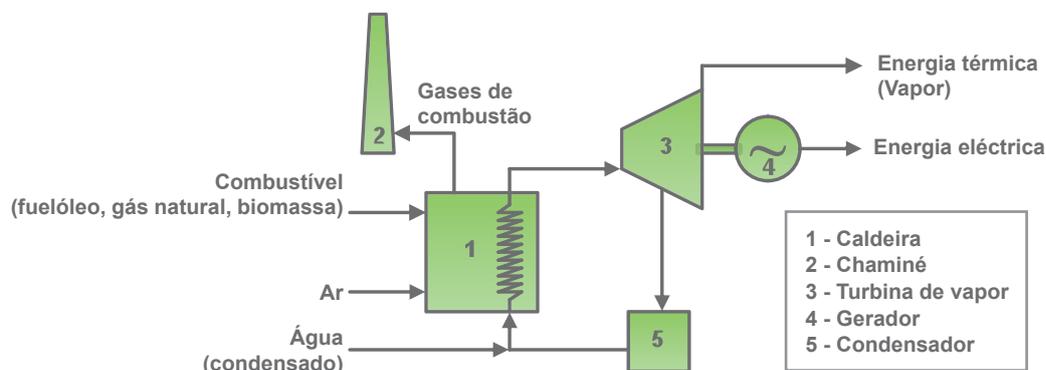
Fig. 2.17/ Esquema de cogeração com turbina de vapor de extracção.

Cogeração com turbina de gás

A cogeração com turbina de gás é adequada para os processos em que se requer uma grande quantidade de energia térmica, ou *rácios* calor/electricidade maiores que 2.

As turbinas de gás são as mais usadas para gerar energia eléctrica em grande escala, gerando potências eléctricas entre 1 e 100 MW. O seu custo é inferior ao das turbinas de vapor, além de que a sua instalação é mais simples e também ocupam menos espaço.

Na cogeração com turbina de gás (ver esquema da Fig. 2.18), um compressor produz ar comprimido a alta pressão que alimenta uma câmara de combustão onde também é injectado o combustível. Da combustão resultam gases a elevada temperatura (900 – 1200 ºC) e pressão, que depois alimentam a turbina e, onde são expandidos para gerar energia mecânica. Esta energia é transformada em energia eléctrica através de um gerador ligado à turbina. Os gases saem da turbina com uma temperatura de 450 - 550 ºC, e a energia contida nesses gases é usada para satisfazer as necessidades térmicas da instalação. Se for necessário mais calor, pode colocar-se uma câmara de combustão adicional entre a turbina e o permutador/recuperador de calor, com a qual se pode elevar a temperatura dos gases até 1000 ºC.
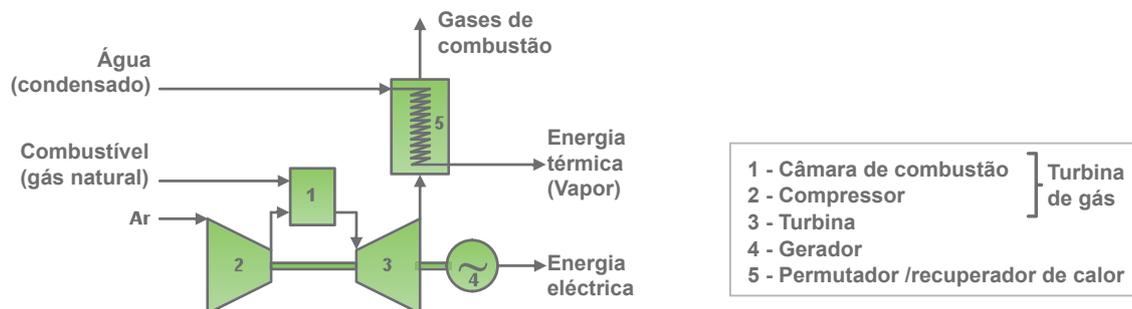
Fig. 2.18/ Esquema de cogeração com turbina de gás.

Na cogeração com turbina de gás, a limpeza dos gases de entrada (combustível e ar) é muito importante já que estes não podem conter agentes poluentes que levem à corrosão das tubagens e equipamentos. Esta é uma das principais razões para o facto do gás natural ser o combustível mais utilizado em cogeração com turbina de gás.

Cogeração com ciclo combinado

A cogeração com ciclo combinado, apresentada esquematicamente na Fig. 2.19, é a solução mais indicada para alimentar sistemas que requerem grandes quantidades de energia eléctrica, sendo especialmente indicada para sistemas que necessitam de *rácios* electricidade/calor maiores que 6.

Uma unidade de cogeração com ciclo combinado faz uso de uma turbina de gás e de uma turbina de vapor. Os gases de saída da turbina de gás têm uma temperatura de cerca de 500 ºC, e devido a essa temperatura elevada, estes gases são usados numa caldeira de recuperação de calor para produzir vapor que vai alimentar a turbina de vapor. Ambas as turbinas estão associadas a geradores que produzem energia eléctrica.
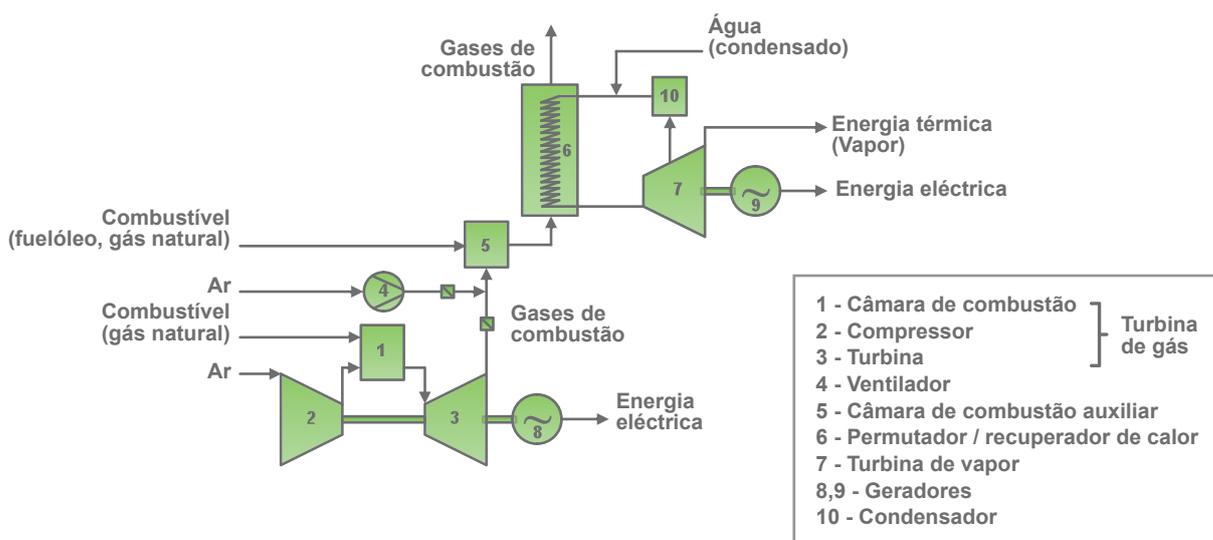
Fig. 2.19/ Esquema de cogeração de ciclo combinado.

Cogeração com motor alternativo de combustão interna

As unidades de cogeração que utilizam motores alternativos de combustão interna têm como principal vantagem a obtenção de uma maior eficiência eléctrica. No entanto, a energia térmica produzida nestas unidades é mais difícil de usar porque geralmente encontra-se a temperaturas mais baixas e mais dispersa.

Também se pode recuperar calor através dos circuitos de refrigeração do motor (p.ex. água de refrigeração de cilindros e circuito de refrigeração do óleo lubrificante). Esse calor recuperado dos circuitos de refrigeração pode ser aproveitado para produzir água quente.

Utilização de microturbinas e outras novas tecnologias

As tecnologias previamente descritas têm eficiências baixas quando são utilizadas em unidades de cogeração pequenas, i.e., unidades com potências eléctricas menores que 1 MW. Como consequência deste facto, actualmente estão a ser desenvolvidas microturbinas que geram potências eléctricas entre 25 e 200 kW e que são mais eficientes nesta gama de potências mais baixas. As microturbinas na gama de potências referida têm custos de projecto e de manutenção menores. Além disso, as microturbinas têm ainda vantagens ambientais, como a baixa quantidade de emissões de óxidos de azoto (NO_X).

Existem ainda outras tecnologias que podem ser aplicadas na cogeração, p.ex., os motores Stirling e as pilhas de combustível. No entanto, estas tecnologias encontram-se ainda numa fase prematura de aplicação ou de desenvolvimento e os seus custos são actualmente elevados.

A Tabela 2.7 lista as eficiências parciais e globais dos vários tipos de cogeração mencionados previamente:

Tabela 2.7/ Eficiências parciais e globais de vários tipos de cogeração. Tabela adaptada de [33].

Cogeração com:	Eficiência Eléctrica (%)	Eficiência Térmica (%)	Eficiência Total (%)
Turbina de vapor	33	52	85
Turbina de gás	38	47	85
Ciclo combinado	57	33	90
Motor alternativo	40	30	70
Microturbinas	30	50	80

Trigeração

A trigeração é um processo que converte a energia primária em três tipos úteis de energia: electricidade, água quente ou vapor, e água refrigerada. Isto é, a trigeração produz energia eléctrica e energia térmica sob a forma de calor útil e de frio. Esta conversão tem maior eficiência e é menos poluente para o ambiente do que a produção dos três tipos de energia em separado.
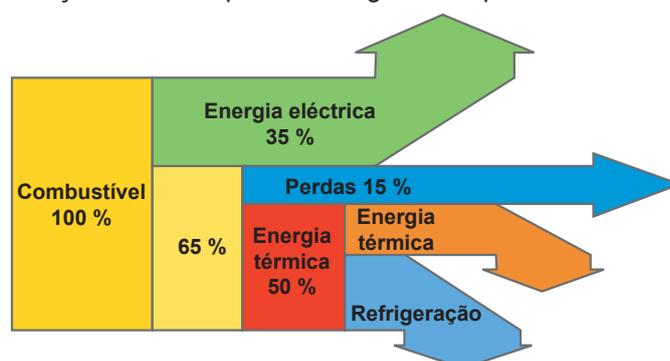
Fig. 2.20/ Rendimentos típicos da trigeração.

Um sistema de trigeração é basicamente um sistema de cogeração ligado a um refrigerador (*chiller*) por compressão ou a um refrigerador de absorção. Como exemplo, a Fig. 2.21 apresenta o esquema mais comum de uma unidade de trigeração, com um refrigerador de absorção (isto é, parte do calor útil produzido alimenta um *chiller* de absorção para a produção de frio).

Enquanto os *chillers* de compressão necessitam de energia eléctrica para alimentação do compressor do ciclo de refrigeração, os *chillers* de absorção utilizam o calor produzido no processo de cogeração (sob a forma de água quente ou vapor ou gases de combustão) para produzir frio. Os *chillers* de absorção são os mais utilizados, e dentro destes, os mais usuais baseiam-se em ciclos de evaporação e de condensação de uma solução concentrada de brometo de lítio.
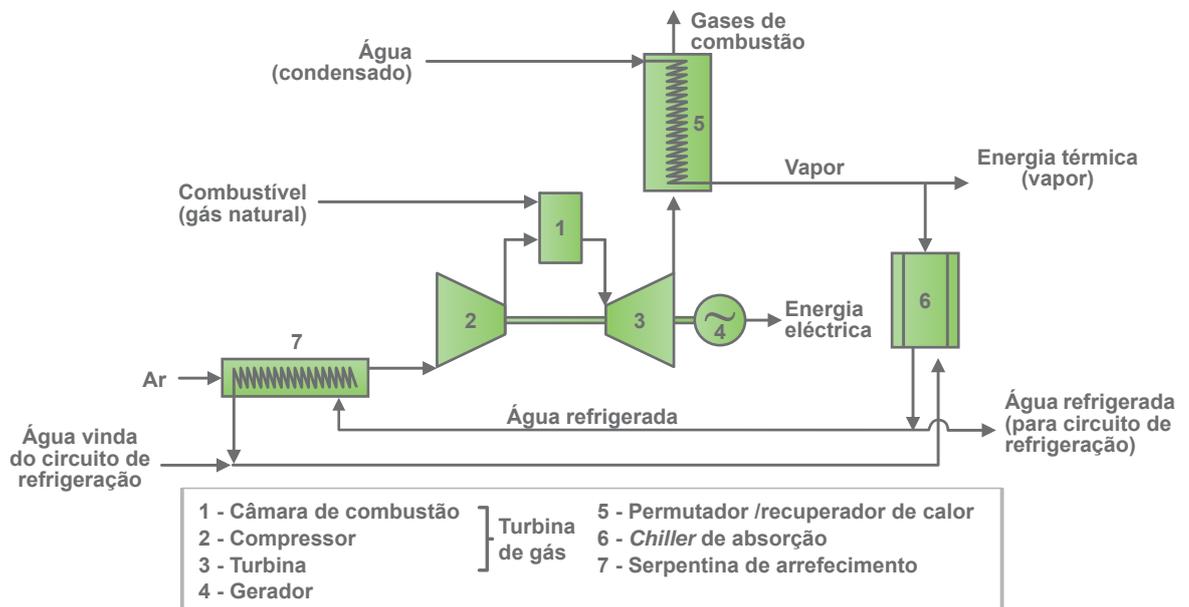
Fig. 2.21/ Esquema de trigeração com refrigerador (*chiller*) de absorção.

Para além das vantagens já mencionadas da cogeração, a trigeração, quando comparada com a produção separada de electricidade, calor e frio, permite uma poupança de combustível até 25 % e a redução das emissões de gases poluentes para a atmosfera. Nos casos em que a trigeração é bem aplicada, a redução total de custos pode chegar aos 30 %. A possibilidade de reduzir os custos de processo é a força motriz para a implementação da trigeração numa unidade industrial [11].

2.1.2.2 Sistemas de combustão

Os sistemas de combustão estão na origem da maior parte da entalpia que é utilizada na concretização dos processos industriais. Neste tópico são apresentadas algumas das Melhores Técnicas Disponíveis (MTDs) para aumentar a eficiência energética em sistemas de combustão. Estas técnicas são tão válidas para sistemas de chama (com queimadores), como para sistemas de combustão em leitos fluidizados.

Neste tópico também se apresentam as tecnologias que permitem optimizar os equipamentos e os circuitos de distribuição do vapor, enquanto veículo processual privilegiado para o transporte de entalpia em processos industriais.

Caldeiras, Fornos e Secadores

Nesta alínea são analisadas as melhores tecnologias relacionadas com as caldeiras, fornos, e secadores, bem como com os respectivos modos de operação industrial.
Apesar de algumas das técnicas aqui apresentadas também se aplicarem a sistemas de produção de vapor, o aumento da eficiência energética destes últimos será alvo de atenção específica mais adiante.

a) Diminuição das perdas térmicas num sistema de combustão [11]

Num sistema de combustão com uma eficiência energética teórica de 100 %, toda a energia libertada na queima do combustível é transferida para o processo que se pretende alimentar. No entanto, tais sistemas ideais não existem e na realidade, parte dessa energia é perdida para o meio envolvente através das paredes e dos gases de combustão (ver Fig. 2.22).
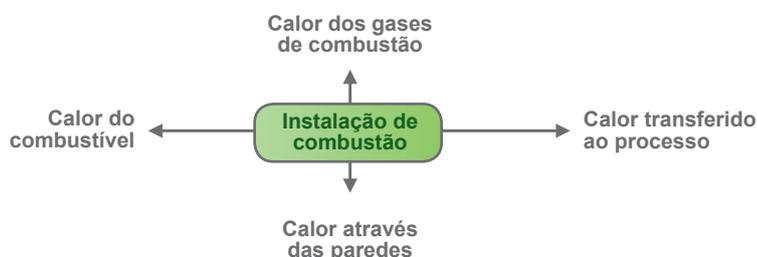
Fig. 2.22/ Balanço de conservação de energia a uma instalação de combustão genérica.

De acordo com a Fig. 2.22, a eficiência energética (η) de um sistema de combustão é dada por:

$$\eta = \frac{\text{Calor transferido para o processo}}{\text{Calor do combustível}} \qquad \text{(Eq. 4)}$$

ou seja,

$$\eta = 1 - \frac{\text{Calor dos gases de combustão} + \text{Calor através das paredes}}{\text{Calor do combustível}} \qquad \text{(Eq. 5)}$$

A definição expressa pela equação anterior indica que as estratégias para aumentar a eficiência energética devem ser orientadas para a diminuição das perdas térmicas através das paredes e dos gases de combustão.

Existem três maneiras de diminuir as perdas térmicas de um sistema de combustão: a primeira é a redução da temperatura de saída dos gases de combustão, a segunda é a diminuição do caudal mássico dos gases de combustão, e a terceira, é a substituição de isolamentos térmicos danificados e a aplicação de isolamentos mais eficazes.

Redução da temperatura de saída dos gases de combustão

As principais estratégias a seguir para reduzir a temperatura de saída dos gases de combustão são:

- O aumento da área ou da taxa de transferência de calor;
- A integração energética de modo a alimentar processos que necessitem de calor (para uma descrição mais detalhada desta estratégia, ver o tópico 2.1.4.3);
- O pré-aquecimento do ar de entrada com os gases de saída da combustão;

- A limpeza e manutenção das superfícies de transferência de calor de modo a evitar a deposição de resíduos sólidos e a manter elevadas taxas de transferência. É prática corrente considerar que um aumento de 1 mm na espessura dos depósitos que se formam nas superfícies de transferência de calor leva a um aumento de 2 % no consumo de combustível (energia primária) [35].

A redução da temperatura de saída dos gases de combustão aumenta a eficiência energética dos sistemas de combustão. Como exemplo, tem-se a seguinte regra geral válida para caldeiras: uma diminuição de 20 ºC na temperatura de saída dos gases de combustão produz um aumento de cerca de 1 % na eficiência energética do sistema [35].
Apesar das vantagens inerentes, as estratégias de redução da temperatura dos gases de combustão devem obedecer às seguintes condições:

- Só se efectua a recuperação do calor excedentário dos gases se existirem locais (p.ex. pontos do processo) disponíveis para receber esse calor;
- Em sistemas que utilizem combustíveis com elevado teor de enxofre, a temperatura de saída dos gases não deverá ser inferior a 200 ºC devido ao ponto de orvalho dos gases de combustão e de modo a evitarem-se problemas de corrosão dos equipamentos devido a condensações de água acidulada pela formação de ácido sulfúrico.

Diminuição do caudal mássico dos gases de combustão

A diminuição do caudal mássico dos gases de combustão é conseguida através da redução do excesso de ar à entrada da instalação de combustão. Este excesso de ar pode ser minimizado através do ajuste proporcional do fluxo de ar em relação ao fluxo de combustível. O controlo do excesso de ar pode ser manual ou automático, dependendo da rapidez das flutuações da necessidade de calor (*output*). A medição *on-line* da percentagem de oxigénio nos gases de combustão permite ter um melhor controlo do excesso de ar.

Como regra geral, tem-se que uma redução de 1 % no excesso de ar (oxigénio) à entrada da instalação de combustão, leva a uma redução do consumo de combustível em 1 % [35]. Outra vantagem da minimização do excesso de ar é a menor emissão de óxidos de azoto (NO_X). No entanto, a minimização do excesso de ar não deve ser exagerada e deve sempre garantir que a queima do combustível decorra com (pelo menos) a quantidade de oxigénio (O_2) necessária a uma combustão total. Se a combustão decorrer com teores de ar demasiado baixos, os gases de combustão podem criar um ambiente explosivo e existe a produção de elevadas quantidades de monóxido de carbono, hidrocarbonetos e partículas poluentes. Por motivos de segurança e ambientais, a combustão deve sempre decorrer numa atmosfera com pelo menos 5 % de excesso de ar. A percentagem de excesso de ar de combustão a utilizar numa instalação depende do tipo de combustível (Tabela 2.8).

Tabela 2.8/ Ponto óptimo de funcionamento de uma instalação de combustão para os combustíveis mais correntes.

Combustível	Gás Natural	GPL	Fuelóleo	Lenha
Excesso de ar de combustão	5 - 10 %	5 - 10 %	15 - 20 %	15 - 50 %
Teor de CO_2	11,4 - 10,9 %	13,1 - 12,6 %	13,7 - 13,2 %	17,5 - 13,3 %
Teor de O_2	1,1 - 2,1 %	1,1 - 2,1 %	2,9 - 3,6 %	2,9 - 7,2 %
Teor de CO	0 %	0 %	0 %	0 %

Uso de isolamentos térmicos mais eficazes e substituição de isolamentos danificados

De modo a minimizar as perdas de calor através das paredes de uma instalação de combustão, a boa eficiência do isolamento térmico deve ser assegurada durante a fase de comissionamento da instalação.

No entanto, os isolamentos térmicos degradam-se, e por isso, devem ser implementados programas de inspecção, manutenção e substituição dos mesmos. Existem algumas técnicas (p.ex. análise termográfica) que podem ser usadas para diagnosticar zonas mal isoladas a partir do exterior. Para informações mais detalhadas sobre isolamentos térmicos, ver o tópico 2.1.4.5.

b) Aumento da eficiência energética de caldeiras, fornos e secadores

Os sistemas de combustão referidos neste tópico são todos os equipamentos que geram calor através da queima de combustíveis e o transferem para um determinado processo. Os principais sistemas de combustão são:

- Caldeiras produtoras de vapor e água quente (usadas em todo o tipo de indústria);
- Fornos de cozedura e calcinação (p.ex., fornos de calcinação de materiais granulados usados na indústria cimenteira);
- Secadores.

As principais medidas a considerar com vista ao aumento da eficiência energética dos sistemas de combustão são apresentadas na seguinte listagem:

Caldeiras

- Melhorar o armazenamento, a preparação e a distribuição de fuelóleo e de combustíveis sólidos;
- Inspeccionar e proceder à manutenção da caldeira e dos queimadores;
- Controlar as condições de combustão através da análise dos gases de combustão (regulação do excesso de ar);
- Adequar a produção da caldeira às necessidades do processo;
- Limpar os tubos de fumos;
- Instalar isolamentos térmicos e inspeccioná-los regularmente;
- Evitar perdas de calor em *stand-by*;
- Tratar as águas e efectuar purgas adequadas;
- Investigar o potencial de recuperação de calor;
- Instalar sistemas de controlo automático;
- Avaliar a possibilidade de substituir a caldeira ou o combustível.

Fornos

- Controlar a qualidade e a dosagem das matérias-primas;
- Inspeccionar e proceder à manutenção dos fornos e dos queimadores;
- Controlar a combustão através da análise dos gases de combustão (regulação do excesso de ar);
- Efectuar uma manutenção adequada dos isolamentos e reparar as fugas;
- Verificar os sistemas de controlo de combustão;
- Programar as cargas.

Secadores

- Controlar a humidade do produto a secar;
- Usar pré-secagem mecânica antes da secagem térmica;
- Não secar os produtos mais do que o necessário;
- Controlar as condições de humidade do ar de secagem;
- Efectuar a manutenção dos isolamentos em bom estado, evitando fugas de ar quente e/ou entradas de ar parasita;
- Estudar a recuperação de calor residual;
- Optimizar os regimes de carga.

Tecnologia de combustão com ar a alta temperatura

Os recuperadores e os regeneradores são os equipamentos que mais contribuem para o aumento da eficiência energética de sistemas de combustão [22]. Estes equipamentos permitem o pré-aquecimento do ar de entrada, aumentando a eficiência energética da combustão. No entanto, este pré-aquecimento também leva a temperaturas de chama mais elevadas, e, consequentemente, pode significar maiores produções de óxidos de azoto (NO_X). Embora as emissões destes NO_X para a atmosfera possam ser reduzidas através do tratamento dos gases de combustão (p.ex., remoção catalítica), os custos associados a esta operação são normalmente elevados. Assim, existe uma pressão ambiental e económica para o desenvolvimento de sistemas de combustão a alta temperatura com baixas produções de NO_X.

Um recuperador é um permutador de calor que extrai calor dos gases de combustão para pré-aquecer o ar de entrada. No caso específico de fornos (fornalhas), a colocação de um recuperador para pré-aquecer o ar de entrada leva a um aumento da eficiência energética em 30 %. Nesta área, os principais desenvolvimentos efectuados têm-se centrado na utilização de queimadores auto-recuperativos e de recuperadores cerâmicos para altas temperaturas. Estes desenvolvimentos têm sempre como objectivo, a maximização da eficiência energética e a minimização das emissões de NO_X. Nos queimadores auto-recuperativos, o recuperador faz parte do queimador, diminuindo os custos em relação à opção de ter um queimador e um recuperador em separado. Os queimadores auto-recuperativos facilitam também a reconversão dos sistemas de combustão já existentes.

Fig. 2.23/ Queimador auto-recuperativo.

Os queimadores regenerativos operam aos pares. Enquanto um queima o combustível, o outro queimador armazena calor num leito cerâmico poroso. Após um determinado período, os dois queimadores invertem os papéis e o calor armazenado no leito cerâmico é usado para pré-aquecer o ar de entrada. Desta forma, 85 - 90 % do calor contido nos gases de saída da combustão é recuperado. Estes equipamentos permitem pré-aquecer o ar de entrada até temperaturas muito elevadas (temperaturas apenas 100 a 150 ºC abaixo da temperatura de operação interna do sistema de combustão), apesar de as possíveis emissões mais elevadas de NO_X limitarem essa temperatura, e dessa forma, também a recuperação energética. Comparando com o consumo de combustível dos queimadores sem pré-aquecimento de ar, a redução do consumo de combustível levada a cabo pelos queimadores regenerativos pode atingir os 50 % ou 60 %[22].

Estima-se que estes tipos de queimadores, quando alimentados a gás natural e mantendo baixas emissões de NO_X, levem a economias energéticas médias de 5 %, sendo esta estimativa válida para as mais variadas aplicações de aquecimento de processos a altas temperaturas.

Em suma, com esta tecnologia, o ar de combustão é pré-aquecido a temperaturas muito altas antes da injecção na fornalha a alta velocidade, permitindo a queima total de combustível mesmo na presença de baixos teores de O_2. As principais vantagens desta tecnologia são [22][11]:

- Maior eficiência energética com redução das emissões de dióxido de carbono (CO_2);
- Perfil de temperaturas mais uniforme;
- Baixas emissões de monóxido de carbono (CO) e de óxidos de azoto (NO_X);
- Aumento da transferência de calor;
- Evita a utilização de outros equipamentos para aumentar a poupança energética nos sistemas de combustão
- Aumento da produtividade e qualidade do produto (se o sistema de combustão fizer parte de um processo produtivo);
- Maior durabilidade do sistema de combustão (fornalha e tubagens);
- Tubagem de exaustão de menor diâmetro;
- Menor ruído de combustão.

Sistemas de geração e distribuição de vapor

As principais medidas para aumentar a eficiência energética em sistemas de geração e distribuição de vapor são as seguintes [11] :

Medidas para aumentar a eficiência na geração e distribuição de vapor

- Utilização de permutadores de calor (economizadores) para pré-aquecer a água de alimentação à caldeira;
- Remoção de depósitos de calcário e/ou de fuligens das superfícies de transferência de calor;
- Minimização de purgas da caldeira;
- Recuperação de calor das purgas;
- Recolha e reutilização dos condensados na caldeira;
- Reutilização do vapor de *flash* (p.ex., vapor gerado por expansão de condensados);
- Programa de controlo e manutenção dos purgadores;
- Isolamento das tubagens, válvulas e flanges;
- Eliminação de fugas de vapor e de condensados;
- Melhoramentos no *lay-out* da rede de distribuição.

Medidas para aumentar a eficiência da combustão

- Ajuste das condições de combustão;
- Instalação de um pré-aquecedor de ar de combustão através dos gases de combustão;
- Instalação de um controlador do teor de oxigénio nos gases de combustão (ajuste em tempo real do excesso de ar).

Medidas de controlo e manutenção

- Manutenção da caldeira;
- Actualização do sistema de controlo de funcionamento da caldeira;
- Minimização das perdas em ciclos curtos de funcionamento;
- Instalação de controladores automáticos do total de sólidos dissolvidos na água do interior da caldeira;
- Substituição de caldeiras em fim de vida.

Note-se que devido à existência de alguma sobreposição de temas, algumas destas medidas se encontram propositadamente repetidas nos tópicos 2.1.2.2 e 2.1.2.3.

c) Utilização de economizadores para pré-aquecimento da água de alimentação da caldeira

A colocação de um economizador (permutador de calor adicional) à saída dos gases de combustão permite o pré-aquecimento da água de alimentação da caldeira. Dependendo do teor de enxofre no combustível utilizado, os economizadores podem estar mais ou menos sujeitos a corrosão

(especialmente aqueles que usam fuelóleo como fluido de recirculação). Assim, o economizador deve ter uma construção modular e permitir a troca rápida das peças que estão mais sujeitas à corrosão.

A colocação de um economizador tem viabilidade económica em caldeiras com temperatura de saída de gases superior a 230 ºC. Esta medida conduz a um aumento da eficiência global da caldeira de 4 % e torna-se especialmente vantajosa se a produção de vapor exceder as 10 t/h [11].

d) Remoção preventiva de depósitos nas superfícies de transferência de calor [11]

Esta medida consiste na remoção química ou mecânica de depósitos sólidos e na eventual reformulação do sistema de tratamento de águas caso a necessidade de limpeza se torne demasiado frequente.
A limpeza mecânica só pode decorrer durante os períodos de paragem programados.
Deve-se também estudar a hipótese de um eventual reajuste da pressão de vapor para o valor mais baixo possível, pois menores pressões implicam menores temperaturas, e consequentemente, uma redução na formação de depósitos. Note-se que um depósito de 1 mm de espessura numa superfície metálica de um permutador de calor representa uma diminuição de 9 % na transferência de calor através dessa superfície.

e) Minimização de purgas das caldeiras [11]

A minimização do caudal de purga das caldeiras reduz substancialmente as perdas energéticas, os custos de tratamento da água de alimentação à caldeira e os custos de tratamento das correntes de purga. Esta medida é muito importante, já que em muitas situações são comuns taxas de purga reais na ordem dos 8 a 10 % do caudal de vapor.

As duas principais opções para minimizar a quantidade de água e de energia desperdiçada nas purgas, são as seguintes:

- Recolha de condensados e reciclagem destes à caldeira. O condensado encontra-se já tratado, sendo desprovido de sólidos dissolvidos. Se metade dos condensados for reutilizada, as purgas são reduzidas em 50 %;
- Pré-tratamento da água de alimentação das caldeiras para remoção de impurezas e iões indesejados. A utilização de permuta iónica ou de processos de membranas (p.ex. osmose inversa) no pré-tratamento das águas de alimentação das caldeiras pode aumentar a eficiência energética através da minimização das purgas. Note-se no entanto que no tratamento de águas duras, comuns no Centro e Sul de Portugal, a utilização de processos de membranas pode dar problemas de colmatação, por isso, a análise caso a caso é aconselhada.

f) Recuperação de calor nas correntes de purga [11]

Se o caudal de purga for superior ou igual a 5 % do caudal de vapor produzido pela caldeira, esta técnica é economicamente viável. O calor recuperado pode ser utilizado para pré-aquecer a água de alimentação às caldeiras. A purga da caldeira pode também ser alimentada a um tanque de produção de vapor, onde o vapor gerado pode ser utilizado no desgaseificador de água de alimentação à caldeira.

g) Implementação de programas de controlo, reparação e substituição de purgadores [11]

A implementação de programas regulares de inspecção e manutenção dos purgadores de um sistema de vapor possibilita a obtenção de elevadas economias de energia. Os sistemas de vapor com frequência de inspecção superior a 3 anos possuem frequentemente um número elevado de purgadores defeituosos (até 30 % do número total) que conduzem a perdas elevadas de vapor. Em contrapartida, nos sistemas com programas de inspecção e manutenção regulares, os purgadores com fugas constituem normalmente menos de 5 % do número total.

Embora os purgadores tenham tempos de vida útil muito curtos, os custos associados à substituição de purgadores defeituosos é sempre muito inferior ao custo das perdas de vapor que ocorrem se tal não acontecer.

h) Recolha de condensados para reutilização na caldeira

Esta técnica apresenta as seguintes vantagens imediatas [11]:

- Redução da quantidade de água a tratar;
- Diminuição do consumo de combustível (os condensados têm uma energia térmica maior do que a água de compensação);
- Redução do caudal de purgas das caldeiras (já referido no tópico e).

i) Utilização de vapor *flash* [11]

A recuperação do vapor *flash* representa uma economia de energia bastante superior à que se verifica com a simples recuperação de condensados, principalmente para condensados a alta pressão, porque o vapor flash destes condensados contém um valor energético muito elevado. Este vapor pode ser utilizado no desgaseificador e/ou no pré-aquecimento de ar.

A recuperação de condensados a baixa temperatura também permite a obtenção de vapor *flash* que pode ser utilizado no aquecimento de componentes a temperaturas inferiores a 100 ºC, p.ex., água para banhos.

j) Isolamento térmico das tubagens de distribuição de vapor e de retorno de condensado e de válvulas e flanges

O reforço ou reparação dos isolamentos térmicos é justificado e conduz a economias energéticas significativas, se existir uma diferença mínima de 50 ºC entre a temperatura da superfície exterior do equipamento e a do meio ambiente.
As perdas de calor que se verificam em válvulas e flanges não isoladas equivalem a perdas de calor em vários metros de tubagem não isolada: por exemplo, as perdas de calor que se verificam numa válvula não isolada são idênticas às que se verificam em um metro de tubagem, com o mesmo diâmetro, não isolada, enquanto que as que se verificam numa flange não isolada são metade do valor atrás indicado.

k) Instalação de um pré-aquecedor de ar [11]

Entre as vantagens do pré-aquecimento do ar (através dos gases de combustão) encontram-se as seguintes:

- Por cada 20 ºC adicionais que são retirados aos gases de saída, a eficiência da caldeira aumenta em 1 %;
- O ar aquecido pode ser utilizado na secagem de combustível, nomeadamente se este se tratar de carvão ou matéria orgânica (biomassa), ou ser utilizado como ar de combustão;
- O pré-aquecimento permite a concepção de caldeiras mais pequenas.

No entanto, algumas desvantagens práticas ocorrem também, entre as quais:

- A permuta de calor entre gases e ar é pouco eficiente, requerendo grandes áreas de permuta;
- A queda de pressão adicional que se verifica nos gases de combustão, o que implica um aumento da pressão a fornecer pelo ventilador de extracção;
- Adaptação/readaptação dos queimadores para a utilização de ar mais quente (o ar mais quente é menos denso e transporta menos O_2 por unidade de volume que o ar que não é aquecido).

l) Minimização de perdas em ciclos curtos de funcionamento das caldeiras [11]

Este ponto reveste-se de especial importância se a caldeira estiver sobredimensionada (a funcionar a 25 % da sua capacidade nominal ou menos) e/ou a funcionar apenas ocasionalmente. Estas perdas energéticas podem ser minimizadas através da substituição de uma caldeira por duas outras mais pequenas, podendo estar apenas uma em *stand-by*.

2.1.2.3 Recuperação de calor [11]

A recuperação de calor perdido é um processo que utiliza tecnologias variadas para a recuperação e reutilização de calor rejeitado pelo processo. Esta energia térmica pode ser recuperada a partir de várias fontes:

- Gases de combustão;
- Efluentes quentes ou frios;
- Ar de exaustão;
- Produtos quentes ou frios, ou restos de produção;
- Água de arrefecimento e óleo hidráulico;
- Fontes termais naturais;
- Painéis solares;
- Calor de sobreaquecimento e calor de condensação rejeitado dos processos de refrigeração;
- Outras fontes.

As tecnologias mais comuns para a recuperação deste calor são:

- Permutadores de calor para fazer uso directo do calor no mesmo estado em que se encontra;
- Bombas de calor e recompressão de vapor, que transformam o calor de modo a gerar trabalho mais útil do que se este se encontrasse à sua temperatura inicial;
- Operações multi-estágio, tais como evaporadores multi-efeito, expansão de vapor e combinações das técnicas acima mencionadas.

Saliente-se que a forma como as tecnologias de recuperação de calor são incluídas num processo industrial deve ser optimizada de maneira a maximizar a economia energética global. Esta optimização global encontra-se no âmbito da Integração Energética, um ramo extremamente importante da Integração de Processos que aplica metodologias (p.ex., metodologia *Pinch*) conducentes a reduções energéticas muito importantes. Devido à sua importância, esta temática será abordada mais detalhadamente num tópico especificamente dedicado à Integração de Processos (ver tópico 2.1.4.3).

Assim, apenas se apresentam de seguida as tecnologias/equipamentos acima mencionados, considerados de forma isolada no âmbito dos diferentes processos industriais.

Permutadores de calor

A utilização de permutadores de calor possibilita a recuperação directa de calor, que consiste na transferência de calor entre dois fluidos através de uma superfície sólida. A transferência de calor ocorre por convecção e condução. Os permutadores de calor são concebidos para aplicações energéticas específicas e optimizadas. Assim, existem vários tipos de permutadores de calor: vários *designs*, diferentes materiais de construção, etc. A escolha do tipo de permutador deve ter em atenção a gama de temperatura de operação e as propriedades físicas dos fluidos envolvidos na transferência de calor. A implementação desta medida permite reduções dos consumos energéticos e das emissões de gases poluentes. Além disso, a sua aplicabilidade estende-se a quase todos os sectores industriais, uma vez que o correspondente período de *payback* é normalmente curto, podendo ser de apenas 6 meses [11].

Devido ao seu *design*, os permutadores de caixa e tubos com *pitch* triangular que utilizem vapor *flash* impuro do lado da caixa, podem ter graves problemas com a deposição de sólidos. Se o vapor que entra do lado da caixa do permutador arrastar consigo gotículas de líquido e espumas que contenham quantidades apreciáveis de sólidos dissolvidos, estes terão tendência a depositarem-se na superfície exterior dos tubos que se situem perto da zona de entrada de vapor na caixa. Este fenómeno diminui a eficiência energética do permutador, dificulta a sua limpeza devido ao *pitch* triangular e pode mesmo inutilizar o permutador permanentemente. A solução para permutadores que utilizem vapor *flash* impuro é a adopção de um *design* diferente, com um *pitch* mais largo e quadrangular.

Os permutadores de calor de caixa e tubos são rotineiramente sujeitos a uma limpeza com ácido para renovar a superfície interna dos tubos e recuperar a eficiência de troca de calor. Esta técnica é aplicável, por exemplo, em fábricas de alumínio com tempos de ciclo dos permutadores de 10 - 15 dias. Os permutadores têm de ser resistentes ao ácido (construção em aço inoxidável), o que se traduz noutra vantagem não imediata: maior durabilidade.

Bombas de calor [11]

As bombas de calor transferem energia térmica de um meio com um nível de temperatura baixo para outro meio a um nível de temperatura mais elevado. Note-se que uma bomba de calor não gera mais calor, apenas transfere o calor existente. As bombas de calor podem recuperar energia térmica numa secção do processo e torná-lo disponível para ser reutilizado numa outra parte específica do processo que necessite de energia. As bombas de calor são também utilizadas em refrigeração.

Para que a bomba de calor transfira energia térmica, esta necessita de ser alimentada por energia externa. Para tal, utiliza-se um motor eléctrico ou um motor de combustão. Existem três tipos de bombas de calor: bombas de compressão, bombas de absorção e bombas abertas. A escolha do tipo de bomba de calor dependerá das características e necessidades do processo industrial.

As bombas de calor têm vantagens e desvantagens:

<u>Vantagens</u>

- Permitem a recuperação de calor perdido e o aumento do nível térmico deste, tornando-o utilizável noutros pontos do processo industrial;
- Efectuam o *upgrade* de calor de baixa temperatura;
- Consomem menos energia primária que os equipamentos de aquecimento convencionais;
- Reduzem significativamente as emissões de dióxido de carbono (CO_2), de dióxido de enxofre (SO_2) e de óxidos de azoto (NO_X);
- As bombas de absorção têm baixos consumos de energia eléctrica.

<u>Desvantagens</u>

- O nível de temperatura máximo do calor obtido é de 140 ºC;
- A rentabilidade económica só é significativa se os preços das energias primárias forem elevados;
- Maior complexidade processual que um sistema de combustão simples.

Do balanço entre as vantagens e desvantagens, resulta que o período de *payback* de uma bomba de calor industrial é, no mínimo, de 2 anos.

Recompressão mecânica de vapor (RMV)

Com esta técnica, vapor de baixa pressão (como seja o vapor extraído de evaporadores, *etc.*) é comprimido mecanicamente e subsequentemente condensado, cedendo calor a uma temperatura mais elevada, podendo substituir vapor vivo ou outra fonte de energia noutro ponto do processo.

2.1.2.4 Frio Industrial [22]

A maior parte da refrigeração industrial é efectuada através de sistemas de refrigeração por compressão mecânica de vapor. Em alguns casos, em vez de refrigeração por compressão, são usados sistemas de refrigeração por absorção.

Existem muitas opções para aumentar a eficiência energética de um sistema de refrigeração. Para além da utilização de novos sistemas, a implementação de estratégias de optimização e controlo nos sistemas já existentes pode levar a melhorias de 30 % em termos de eficiência energética.

A aplicação de novos sistemas de refrigeração inclui a utilização de: bombas de calor de absorção, novos fluidos frigorigéneos (p.ex., amoníaco, CO_2) e acumulação térmica de frio (acumulação de energia latente). Estas tecnologias são apresentadas de seguida de forma sucinta.

Utilização de motores a gasolina

Em vez de um motor eléctrico, é possível utilizar um motor a gasolina para transmitir energia mecânica ao compressor de um sistema de refrigeração. Este sistema já foi testado na produção de gelo, na indústria alimentar e na indústria química. Além disso, um sistema de refrigeração com motor a gasolina pode ter um *chiller* de absorção acoplado.

Com a utilização de um motor a gasolina (sem o refrigerador de absorção) um sistema pode poupar até 52 % do consumo de energia primária inicial. Com o *chiller* de absorção acoplado, essa poupança pode atingir os 77 %. Note-se no entanto que, apesar dos valores elevados das poupanças energéticas, estas medidas necessitam de investimentos consideráveis em equipamento (especialmente se o sistema incluir o passo de refrigeração por absorção). Assim, os sistemas com e sem refrigeração de absorção têm períodos de *payback* que atingem os 4 anos e os 2 anos, respectivamente.

Especial atenção também para o facto de o motor a gasolina aumentar as emissões de NO_X, o que pode em alguns casos implicar a implementação de medidas extra que visem a diminuição das emissões.

Termoacumulação (acumulação de energia latente)

A termoacumulação é uma tecnologia “antiga” que tem vindo a ser redescoberta para aplicações industriais (p.ex., indústria alimentar). Esta tecnologia permite a produção de gelo nos períodos em que a electricidade é mais barata (períodos de vazio) e o armazenamento do gelo em bancos de gelo até este ser utilizado para refrigeração. Como a electricidade é bastante mais cara nos períodos de pico de consumo, esta tecnologia simples torna-se bastante atractiva.

Novos fluidos frigorigéneos

Devido ao Protocolo de Montreal, os esforços de investigação têm-se centrado no desenvolvimento de fluidos de refrigeração alternativos aos clorofluorcarbonetos (CFCs) e hidroclorofluorcarbonetos (HCFCs).

Estes fluidos alternativos podem reduzir o consumo energético (entre 2 e 20 % segundo os relatórios publicados).

No Japão, têm-se conseguido progressos na utilização de hidretos metálicos, enquanto alguns dos desenvolvimentos mais recentes incluem a utilização de fluidos refrigerantes naturais. Um desses desenvolvimentos envolve a utilização de CO_2 na refrigeração de locais de armazenamento.

2.1.3 ILUMINAÇÃO

A energia eléctrica consumida nas instalações de iluminação nos diferentes sectores de actividade (indústria, serviços e doméstico) representa aproximadamente 25 % do consumo global do país, e cerca de 5 % a 7 % do consumo global de energia eléctrica de uma instalação industrial. Trata-se portanto duma área onde a utilização de equipamentos mais eficazes se traduzirá em reduções significativas de consumos energéticos.

Assim, procura-se hoje em dia instalar equipamentos que proporcionem os níveis de iluminação necessários e recomendados ao desempenho das actividades, reduzindo quer o consumo de energia eléctrica quer os custos de manutenção dos sistemas.

A concepção das instalações de iluminação com utilização racional óptima de energia pressupõe a verificação de alguns parâmetros essenciais para a redução dos consumos energéticos, mantendo ou melhorando as condições globais de iluminação nos espaços considerados. Assim, deve ter-se em consideração os seguintes aspectos:

- Dar prioridade à iluminação natural, mantendo limpas as áreas de entrada de luz;
- Dimensionar correctamente os níveis de iluminação necessários para os diferentes postos de trabalho;
- Optar pelo tipo de iluminação mais adequada para cada local e para as tarefas a executar;
- Utilizar sempre equipamentos de rendimento elevado (lâmpadas, luminárias e acessórios);
- Utilizar sistemas de controlo e comando automático nas instalações de iluminação;
- Utilizar sempre que possível luminárias que permitam uma integração com o ar condicionado;
- Proceder a operações de limpeza regulares e manutenção das instalações, de acordo com um plano estabelecido;
- Definir correctamente os períodos de substituição das lâmpadas e optar sempre pela substituição em grupos.

Na maioria das situações, o acréscimo de investimento inicial devido à utilização dos equipamentos atrás descritos é recuperado em tempo aceitável através das economias de energia que proporcionam.

2.1.3.1 Lâmpadas

Existem vários tipos de lâmpadas que podem apresentar diferentes eficiências luminosas. O seu valor é expresso em lúmens por watt (lm/W) e representa a relação entre a quantidade de luz emitida e a quantidade de energia eléctrica absorvida.

As reduções do consumo de energia eléctrica nas instalações de iluminação passam pela utilização de lâmpadas de elevada eficiência energética.

Na Tabela 2.9 são indicados vários tipos de lâmpadas existentes e as respectivas características básicas em termos de desempenho (potência, eficiência energética e duração).

Tabela 2.9/ Tipos de lâmpadas e respectivas características de desempenho. Adaptado de [34].

Tipo de Lâmpada		Potência (W)	Eficácia energética (lm/W)	Duração média (h)
Incandescente	*Standard*	3 - 1 500	6 - 24	750 - 2 000
	Halogéneo	10 - 1 500	8 - 35	2 000 - 4 000
Fluorescente	Tubular / tamanho normal	4 - 215	26 - 105	7 500 - 24 000
	Compacta	5 - 58	28 - 84	10 000 - 20 000
Descarga em alta pressão	Iodetos metálicos	32 - 2 000	50 - 110	6 000 - 20 000
	Vapor de sódio a alta pressão	35 - 1 000	50 - 120	16 000 - 24 000

Todas as lâmpadas fluorescentes têm um elevado rendimento luminoso, baixo consumo e vida útil longa. Duram 8 a 10 vezes mais do que as lâmpadas incandescentes convencionais e economizam cerca de 85 % de energia.

As lâmpadas mais indicadas para a iluminação interior de edifícios são as lâmpadas fluorescentes tubulares, podendo ser também utilizadas as lâmpadas fluorescentes compactas sempre que se verificar um período de funcionamento contínuo superior a duas horas.

As lâmpadas mais aconselháveis para os ambientes industriais são lâmpadas de descarga, nomeadamente lâmpadas de vapor de sódio, embora actualmente se encontre em muitas empresas iluminação fluorescente. No entanto, na iluminação exterior deverão ser utilizadas lâmpadas de iodetos metálicos ou de vapor de sódio a alta pressão, já que este tipo de lâmpadas, para a mesma potência nominal, fornece um fluxo luminoso superior às lâmpadas de vapor de mercúrio.

Deve referir-se ainda a existência de rotulagem energética aplicada ao caso específico das lâmpadas, cujos rótulos devem incluir, entre outra informação relevante, a respectiva classe de eficiência energética (classe A, mais eficiente, até à classe G, a menos eficiente).

O Decreto-Lei nº 108/2007, de 12 de Abril, determina a aplicação de uma taxa sobre as lâmpadas de baixa eficiência energética, com o objectivo de compensar os custos ambientais decorrentes da sua utilização. No âmbito do definido nesse Decreto-Lei, a Portaria nº 54/2008, de 18 de Janeiro, designa os tipos e modelos de lâmpadas considerados de baixa eficiência energética e as lâmpadas alternativas consideradas de elevada eficiência energética.

A Portaria nº 54/2008, de 18 de Janeiro, também estabelece que a taxa de baixa eficiência energética incide sobre as seguintes lâmpadas:

a) Incandescentes de utilização genérica, sem halogéneo, de qualquer formato ou tipo de acabamento (claras, foscas e opalinas), com casquilhos E14, E27 e B22, de potência entre 15 W e 200 W e tensão de funcionamento entre 220 V e 240 V, ainda que incluídas em luminárias (excepções: lâmpadas incandescentes reflectoras, de calote, de construção reforçada e de utilização em frigoríficos, fornos e microondas);
b) De vapor de mercúrio de alta pressão sem iodetos, geralmente iluminação urbana e industrial com potência entre 50 W e 1000 W.

A Portaria nº 63/2008, de 21 de Janeiro, estabelece que a taxa sobre as lâmpadas de baixa eficiência energética assume o valor de 0,41 euros para as lâmpadas referidas na alínea *a)* e o valor de 6,77 euros para as lâmpadas referidas na alínea *b)*.

2.1.3.2 Luminárias

Em cada tipo ou sistema de iluminação existem equipamentos com rendimentos bastante diferentes. Os mais eficientes serão aqueles que incluem não só a utilização de lâmpadas de elevada eficiência energética, mas também luminárias equipadas com reflectores espelhados, que permitem elevar o rendimento total do sistema.

A disposição das luminárias, assim como o seu seccionamento, são também factores bastante importantes na qualidade da iluminação. A disposição das luminárias deve evitar os encandeamentos nos planos de trabalho, enquanto que o seccionamento deve permitir desligar uma secção sempre que a iluminação natural seja suficiente, permitindo pois uma redução no consumo de energia.

2.1.3.3 Sistemas de controlo de iluminação

Os sistemas de controlo de iluminação, possuidores de tecnologias de automação, são fundamentais para a redução do consumo energético. Num processo industrial, a zona fabril deve estar dividida em vários sectores de iluminação independentes, cujo funcionamento deve reflectir a sequência operacional do processo, sob pena de existir iluminação onde esta não é necessária. A utilização de sistemas de controlo permite o funcionamento optimizado dos vários sectores de iluminação, adaptando o nível de iluminação de acordo com as características do local e do processo.

A utilização de sistemas de controlo da iluminação, nomeadamente reguladores de fluxo luminoso, permite que o nível de iluminação seja apenas o necessário para a actividade desenvolvida, reduzindo assim o consumo energético. Deve salientar-se que as lâmpadas fluorescentes tubulares com balastro normal não permitem a utilização de reguladores de fluxo luminoso.

Outro dos sistemas de controlo de iluminação que permite reduzir os consumos energéticos é a instalação de sensores de presença. No entanto, os sensores de presença só funcionam eficientemente se forem bem seleccionados e se as lâmpadas sobre as quais irão actuar forem incandescentes ou fluorescentes com balastros electrónicos.

A utilização de relógios temporizadores ou sensores crepusculares (células fotoeléctricas) na iluminação exterior permite que a iluminação seja ligada apenas quando é necessária, evitando assim consumos de energia em períodos de boa iluminação natural.

2.1.3.4 Integração da iluminação nos sistemas de climatização

Na generalidade das instalações de iluminação, apenas uma pequena parte da energia radiada é luminosa (21 %), sendo a maior parte emitida sob a forma de calor (79 %), contribuindo assim para o aquecimento interior dos edifícios.

Assim, é importante dimensionar um sistema de climatização, não só tendo em conta as condições climáticas da região para os diferentes períodos do ano, mas também considerando as condições de iluminação.
A possibilidade de integração dos sistemas de iluminação nos de climatização ambiente permite optimizar as condições de emissão do fluxo luminoso e permite uma melhor gestão das cargas térmicas, o que se poderá traduzir numa redução dos consumos energéticos.

2.1.4 EFICIÊNCIA DO PROCESSO INDUSTRIAL/OUTROS

2.1.4.1 Monitorização e controlo

A gestão da energia consumida é uma tarefa que engloba várias medidas, tais como o planeamento, a monitorização e a implementação de estratégias de controlo optimizadas. Geralmente, o custo inicial da implementação destas medidas é relativamente baixo, principalmente se comparado com as possíveis melhorias de economia energética, produtividade e qualidade dos produtos. De facto, devido ao seu domínio transversal, os sistemas modernos de controlo de processo não são concebidos exclusivamente para a eficiência energética, mas também para a optimização da produção, da qualidade do produto e da segurança dos operadores dos equipamentos produtivos.

Metodologia para a implementação de sistemas de monitorização e controlo

De forma a implementar com sucesso um sistema de monitorização e controlo, a empresa terá de adoptar um certo número de procedimentos com vista a determinar as suas necessidades específicas.

A primeira medida a tomar é a realização de um diagnóstico energético à instalação de modo a identificarem-se os locais susceptíveis de um controlo dos consumos de energia. Estes locais são denominados por Centros de Custos e podem corresponder a uma linha de produção, a um único equipamento, à totalidade da instalação, ou a outro qualquer local em que o consumo de energia apresenta valores que justifiquem o seu controlo.

Uma vez definidos os Centros de Custos, são determinadas as necessidades de aparelhos de medida, procedendo-se de seguida à sua instalação. Os consumos de energia passam a ser medidos regularmente (numa base semanal ou diária) bem como os valores da produção de cada Centro de Custos, sendo assim calculados os consumos específicos de energia, ou seja, a quantidade de energia consumida por unidade produzida.

Através da análise dos dados obtidos, e levando em conta o modo como o consumo de energia depende da produção, podem-se estabelecer valores padrão. Estes valores resultam das medições efectuadas durante um determinado período de tempo em circunstâncias normais de funcionamento da instalação e serão os valores de referência em relação aos quais os desempenhos energéticos da instalação são comparados. Em termos de gestão pretende-se que os valores padrão sejam constantemente alcançados, uma vez que a experiência já provou que tal é possível.

De seguida são estabelecidas metas realistas de redução dos consumos com vista a melhorar a eficiência energética para além dos valores padrão através de determinadas medidas que se julguem possíveis de implementar.
A monitorização dos consumos de energia e das produções deverá ser contínua, sendo os valores padrão e as metas sujeitos a uma actualização sempre que tal se justifique, ou seja, sempre que as metas inicialmente propostas sejam atingidas. Esta técnica de controlo de energia e estabelecimento de metas, também conhecida por *M&T* (do inglês “*Monitoring and Targeting*”), pode conduzir a economias de energia total entre 5 e 15 %, ou se nos referirmos apenas a energia eléctrica a economias de 2 a 8 %.

Sistemas de gestão de energia e sistemas de controlo avançado [22]

A aplicação de sistemas de gestão de energia e de sistemas de controlo avançado ocorre em todos os sectores industriais. Em alguns sectores estes sistemas estão mais desenvolvidos que noutros, no entanto, em todos eles, a optimização dos sistemas de controlo leva a custos de manutenção mais reduzidos, tempos de processamento e de paragem menores, maior eficiência energética e menores emissões de efluentes e gases poluentes. A Tabela 2.10 apresenta algumas classes de sistemas de controlo e os respectivos potenciais de economia.

Tabela 2.10/ Classificação dos sistemas de controlo e potenciais de economia energética típicos. Adaptada de [22].

Sistema	Características	Potencial de economia energética típico (%)
Monitorização e Estabelecimento de Metas	Sistemas dedicados para várias indústrias.	4 - 17
Produção Integrada por Computador (*Computer Integrated Manufacturing - CIM*)	Melhoria da economia do processo, *e.g.*, produtividade, *stocks* e consumo de energia.	> 2
Controlo de Processo	Controlo de temperatura, humidade, pressão, caudais, composições, *etc.*	2 - 18

Nota: As economias energéticas reportadas na última coluna não são aditivas devido à sobreposição dos domínios dos vários sistemas

O bom funcionamento de um sistema de controlo depende da informação obtida em vários pontos do processo. Assim, uma área muito importante é o desenvolvimento de novos sensores que sejam baratos, estáveis, duradouros, precisos e que façam medições em tempo real.

Os novos sistemas de gestão de energia que utilizam inteligência artificial, redes neuronais e algoritmos baseados em regras heurísticas, conseguem obter um controlo óptimo dos processos e “aprendem” a partir de experiências anteriores.

Foi feita uma análise profunda sobre a utilização de sistemas de gestão de energia, assumindo que estes sistemas permitem uma eficiência energética média de 3 %, um tempo de vida útil médio de 10 anos, e períodos de *payback* entre 1 e 4 anos com um valor médio de 2 anos.

Note-se, novamente, que o cálculo estimado dos períodos de *payback* destes sistemas é difícil, uma vez que a maior parte dos benefícios resultantes não estão directamente relacionados com a energia. Os benefícios são maioritariamente indirectos e estão relacionados com a eficiência de produção e com a qualidade da produção.

2.1.4.2 Tratamento de efluentes

Tratamento anaeróbio de águas residuais [22]

O tratamento anaeróbio é um método alternativo para limpar as águas residuais industriais que se baseia na conversão dos compostos orgânicos existentes no efluente em biogás contendo metano, dióxido de carbono e sulfureto de hidrogénio. Este processo é levado a cabo por bactérias num ambiente sem oxigénio (anaeróbio). O tratamento anaeróbio de águas residuais não só permite reduzir o consumo de energia eléctrica, como também permite a utilização para queima do biogás produzido. Esta tecnologia é usada em todo o mundo em centenas de instalações industriais, estando a ser adoptada rapidamente no Brasil, no Japão, na China e na Europa. Os resultados obtidos no Reino Unido, Holanda, Canadá e EUA apontam para que o período de *payback* associado à implementação desta tecnologia se situe entre os 1,4 e os 3,7 anos.

A aplicação do tratamento anaeróbio de águas residuais depende não só dos custos da energia, mas também dos custos de controlo e despejo dos efluentes. A adopção de regulamentação ambiental mais rigorosa, a implementação de programas de demonstração patrocinados pelo governo e o investimento em programas de incentivo, são algumas das medidas que podem ajudar a promover a aplicação desta tecnologia.

Tratamento de águas residuais com tecnologia de membranas [22]

Actualmente, os processos de separação com membranas são utilizados numa grande variedade de sectores industriais, p.ex., metalúrgico, químico, papel, electrónica e, alimentação e bebidas.

Os processos de membranas conseguem remover muitos dos contaminantes existentes nas águas residuais, obtendo-se água tratada que pode ser reaproveitada no processo ou eliminada sem problemas ambientais associados. Os contaminantes removidos nestes processos são muito diversos, p.ex., compostos orgânicos e compostos metálicos. Os processos de membranas também podem ser utilizados para remover sólidos dissolvidos ou suspensos, bactérias, resíduos de emulsões, etc.

Os processos de membranas mais utilizados no tratamento de águas residuais são a microfiltração (MF), a ultrafiltração (UF), a nanofiltração (NF) e a osmose inversa (OI). A diferença entre estes processos de membranas reside nas diferentes capacidades de separação de cada um deles. Esta capacidade de separação é função do tamanho dos poros das membranas e do tamanho dos compostos, da sua carga eléctrica e de outras propriedades.

A principal força motriz para a aplicação de processos de membranas é o custo global do tratamento das águas residuais (usando um método alternativo), e não o custo da energia, embora os processos de membranas possam ter consumos energéticos 40 a 55 % mais baixos que a evaporação. São também conseguidas poupanças adicionais ao nível dos custos operacionais, do consumo de água e da qualidade dos produtos.

O investimento e os custos de operação dependem fortemente da especificidade da aplicação e do local. Os custos de capital dos processos de membranas são relativamente elevados, mas podem ser menores que alguns processos de separação alternativos. Geralmente, nos sistemas de membranas, metade dos custos de capital são para os equipamentos (bombas, tubagens, *etc.*).

A reutilização de água tratada diminui os custos associados ao consumo de água e ao seu despejo.
O tempo de vida útil de um sistema de membranas a operar correctamente excede facilmente os 10 anos.

2.1.4.3 Integração de processos [43]

A Integração de Processos surgiu recentemente como área científico-tecnológica devidamente estruturada no âmbito da engenharia de processos, mas trouxe já um elevado impacto à comunidade Industrial. Os benefícios da sua aplicação traduzem-se na generalidade em processos mais competitivos e actualizados em vários sectores de actividade industrial. A Integração de Processos exerce também um papel determinante na prevenção de danos ambientais.
Uma importante área de utilização da Integração de Processos é a Integração Energética. Muitos dos métodos de análise actualmente generalizados a várias áreas tiveram a sua origem em estudos centrados nos sistemas de energia. O balanço de energia de um processo pode ser utilizado para optimizar o recurso às utilidades exteriores ao processo. Para tal, é necessário conhecer o processo na sua totalidade de modo a poder fazer interagir, de forma globalmente optimizada, os vários componentes. Em seguida é necessário também conhecer as metodologias de modo a tirar a melhor utilização da sua implementação.

As técnicas de Integração de Processos podem ser aplicadas em projectos feitos de raiz ou em instalações já existentes, em processos simples ou de elevada complexidade, e em funcionamento contínuo ou descontínuo. O principal benefício da Integração de Processos é reduzir significativamente os custos de produção, satisfazendo políticas de utilização racional de energia e de matérias-primas, bem como, entre outros, a redução de efluentes e subprodutos e a minimização de emissões gasosas. Nesta perspectiva, a Integração de Processos é uma importante ferramenta estratégica para promover a competitividade da indústria actual. Assim, a formação de especialistas nesta área reveste-se também da maior importância para o futuro da indústria dum país.

O contexto da Integração Energética

A utilização racional de energia num processo requer que se conheçam as características do mesmo. São conhecidas várias metodologias para determinar quais os valores óptimos das variáveis de projecto que minimizam os custos e aproveitam ao máximo o potencial energético do processo. A metodologia da Integração Energética de Processos é apresentada de seguida através da sua aplicação a um exemplo simples de uma parte de um processo químico hipotético.

No tópico seguinte apresentam-se os conceitos básicos a considerar quando se pretende proceder a uma integração energética numa unidade fabril existente ou mesmo num novo projecto.

A Integração Energética e os conceitos básicos

O funcionamento de um processo industrial requer a inclusão de utilidades. Incluem-se neste grupo as utilidades quentes e frias que visam satisfazer as necessidades entálpicas do processo. As correntes processuais podem requerer aquecimento ou arrefecimento, pelo que se impõe uma troca entálpica. Quando se recorre exclusivamente a utilidades externas ao processo, o consumo de energia é maximizado. A Fig. 2.24 apresenta o esquema dum exemplo de aplicação, onde são evidenciadas as correntes sujeitas a integração e a utilização de utilidades exteriores ao processo. Nesta figura identificam-se quatro correntes que necessitam de serem aquecidas ou arrefecidas usando utilidades exteriores. Numa primeira abordagem convém reter quatro conceitos básicos:
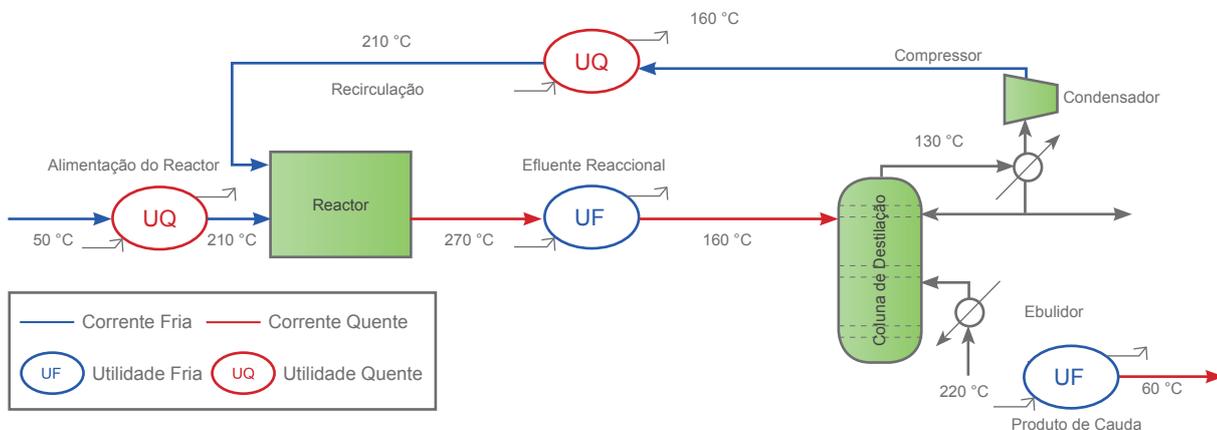
Fig. 2.24/ Esquema de um processo químico tipo: exemplo de aplicação.Adaptado de [44].

- Correntes Frias - Estas correntes recebem calor porque a sua temperatura precisa de aumentar e/ou porque sofrem uma mudança de estado por transferência de calor. Estas necessidades são satisfeitas por um fluido de aquecimento, usualmente vapor de água.

- Correntes Quentes - Estas correntes cedem calor porque a sua temperatura precisa de diminuir e/ou porque sofrem uma mudança de estado por libertação de calor. Estas necessidades são satisfeitas por um fluido de arrefecimento, usualmente água de refrigeração.

- Utilidades Externas - Fluidos exteriores ao processo que permutam directamente com as respectivas correntes de forma a fornecer-lhes ou retirar-lhes calor. Podem ser quentes (vapor de água, fluidos quentes, efluentes gasosos, gases de combustão, entre outros) ou frias (água de refrigeração, ar atmosférico, fluido de arrefecimento, entre outros).

- $\Delta T_{mín}$ - Diferença mínima de temperatura atingida entre duas correntes que trocam calor. Num permutador de calor em contra-corrente, os perfis de temperatura das correntes aproximam-se num dos extremos (Fig. 2.25): esta diferença de temperaturas de aproximação mínima é estabelecida segundo critérios de projecto e tem influência nos custos de capital do processo.
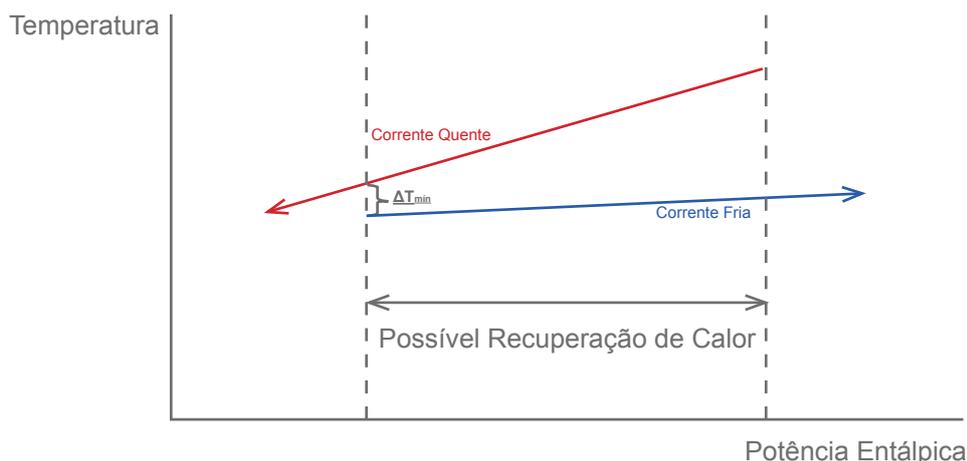
Fig. 2.25/ Exemplificação do $\Delta T_{mín}$

A integração energética permite reduzir o consumo de utilidades exteriores ao processo aproveitando os excessos entálpicos de correntes (correntes quentes) para fornecer às correntes com deficiência de entalpia (correntes frias). Assim, procede-se a uma troca de calor, onde a diferença de temperaturas é a "força motriz". Após a análise de integração, as correntes com estas características deixam de permutar calor apenas com utilidades externas e passam a permutar também entre si. A aplicação da Integração Energética ao processo da Fig. 2.24 origina um novo diagrama do processo, esquematizado pela Fig. 2.26, que se apresenta mais optimizado.
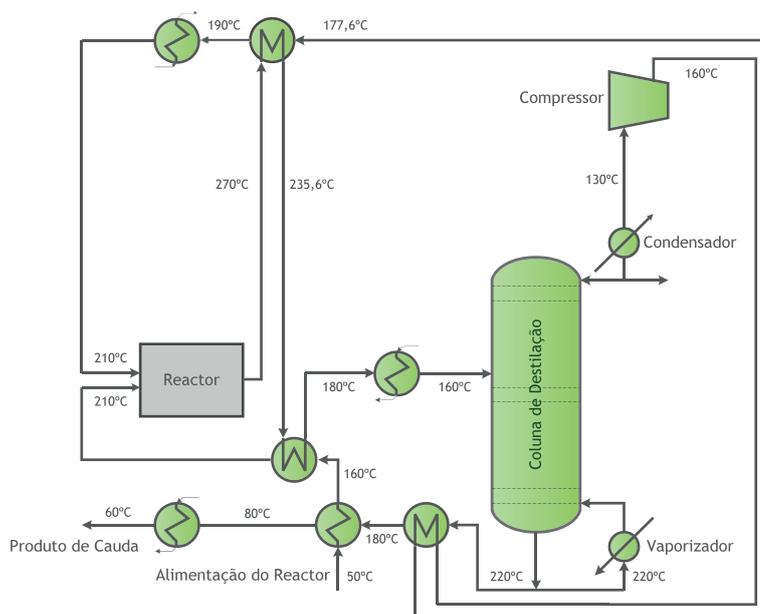
Fig. 2.26/ Esquema do processo químico da Fig. 2.24 com integração energética incorporada. Adaptado de [44].

Este processo apresenta sete permutadores de calor, em detrimento dos quatro apresentados na Fig. 2.24. No entanto, o consumo total de energia reduz-se para 1,8 MWh. Os custos totais apresentam uma redução de 50 %.

Condicionantes à Integração Energética

Estas condicionantes poderão ter origem em diversas causas. O *layout* da unidade fabril pode impossibilitar a integração energética por envolver correntes que se distanciam bastante fisicamente, traduzindo-se em elevados custos de tubagem e bombagem, entre outros.

A segurança poderá ser posta em causa em alguns cenários que envolvam, por exemplo, troca de calor entre uma corrente de hidrocarbonetos e outra rica em oxigénio.

A pureza de um certo produto poderá ser afectada se este, ao passar num permutador de calor, receber alguma contaminação da outra corrente envolvida: esta permuta de calor deverá ser evitada, caso se trate de um produto com elevado valor, altamente poluente ou perigoso.

Questões operatórias que possam estar em causa no arranque ou paragem da unidade poderão também ser condicionantes de certos cenários, bem como o controlo e a flexibilidade do próprio processo.

No que respeita ao plano económico, uma certa integração energética poderá ser rejeitada caso o torne inviável. No entanto, partindo de todas as correntes possíveis, os custos energéticos e totais poderão ser avaliados para todas as opções e estudado o efeito das alterações consideradas nos mesmos.

Estratégia para uma Integração Energética eficiente

Uma estratégia bem estruturada para efectuar uma adequada aplicação da Integração Energética passa por quatro etapas essenciais [44]

- Recolha de dados/características sobre o processo e o sistema de utilidades;
- Determinação dos objectivos a alcançar de modo a maximizar o desempenho em vários aspectos;
- Construção de uma rede de permutadores de calor;
- Simplificação da rede proposta para diferentes cenários económicos.

Anteriormente à implementação desta estratégia deve garantir-se a correcta definição do problema e deve complementar-se a estratégia com informação relevante referente a dados de custos e critérios económicos. Uma ideia a ter em consideração no processo de análise de integração energética é começar por incluir todas as correntes do processo. Numa fase posterior poderá ser necessário excluir correntes “proibidas”, por razões devidamente fundamentadas.

2.1.4.4 Manutenção de equipamentos

Os equipamentos necessitam de monitorização, manutenção e (se necessário) de reparação para que se mantenham eficientes. Os sistemas de gestão de energia permitem a detecção de situações anormais através da medição de consumos (de água, electricidade, gás ou outro combustível) não proporcionais à utilização, auxiliando assim os serviços de manutenção.

A manutenção de equipamentos visando a optimização da eficiência energética deverá incidir nos seguintes pressupostos:

- Alocar de forma clara a responsabilidade pelo planeamento e execução da manutenção;
- Estabelecer um programa de manutenção estruturado com base nas normas e nas descrições técnicas dos equipamentos, bem como em qualquer avaria nos equipamentos e respectivas consequências;
- Suportar o programa de manutenção pela adopção de sistemas de registo de dados apropriados e por testes de diagnóstico;
- Identificar, através da manutenção de rotina, avarias, anormalidades em eficiência energética ou identificar áreas onde a eficiência energética pode ser melhorada;
- Identificar e rectificar rapidamente qualquer fuga ou equipamento em falha que afecte ou controle a utilização da energia.

De seguida são apresentadas algumas medidas de manutenção de equipamentos específicos que permitem manter um processo optimizado em termos de consumo energético.

Manutenção de caldeiras

Para o bom funcionamento de uma caldeira, devem ser executadas as seguintes operações:
- A produção de vapor na caldeira deve ser medida, directa ou indirectamente, medindo-se o total da água de alimentação e calculando as quantidades perdidas nas descargas de fundo da caldeira. A relação vapor/combustível é a melhor medida de eficiência da caldeira e deve ser mantida a um nível elevado;
- Deve-se manter um registo permanente da eficiência da caldeira de modo que os sinais de mau funcionamento possam ser detectados com antecedência;
- Deve-se examinar periodicamente os contadores de vapor, pois deterioram-se com o tempo. Se a pressão de operação for alterada, o contador deverá ser recalibrado ou, alternativamente, as leituras realizadas devem ser corrigidas;
- Deve-se vistoriar com regularidade o sistema de tubagem;
- As tubagens fora de uso devem ser isoladas ou retiradas se redundantes;
- O cálculo do consumo e do fornecimento de energia à casa das caldeiras deve ser o mais realista possível;
- A manutenção da casa de caldeiras deve ser revista, principalmente no que diz respeito ao equipamento de combustão, aos controlos e aos instrumentos. Deve adoptar-se uma rotina de verificação regular;
- Limpeza periódica das superfícies de transferência de calor ou dos tubos de fumo;
- O estado dos isolamentos térmicos e do sistema de exaustão das caldeiras deve ser verificado periodicamente;
- Em instalações de caldeiras mais antigas, as canalizações subterrâneas de exaustão devem ser inspeccionadas com vista a possíveis infiltrações de água;
- As fugas de vapor devem ser prontamente reparadas de modo a se evitarem desperdícios de energia e potenciais acidentes.

Manutenção de permutadores de calor

Devido à sua importância na maioria dos processos industriais, uma manutenção eficaz dos permutadores de calor é imprescindível. Especial atenção deve ser dada à limpeza (química ou mecânica) das superfícies de transferência de calor.

Manutenção de sistemas de iluminação

Proceder regularmente a operações de limpeza e de manutenção dos sistemas de iluminação. Estas operações devem ser executadas de acordo com um plano pré-estabelecido e apoiado preferencialmente nos sistemas automáticos de gestão da iluminação. Utilizar o método de substituição em grupo, como forma de manutenção das instalações (ver tópico 2.1.3).

Outros equipamentos

As operações de manutenção de outros equipamentos consumidores de energia considerados importantes encontram-se referenciadas nos tópicos onde esses equipamentos são descritos.

2.1.4.5 Isolamentos térmicos

O melhoramento do isolamento térmico de superfícies (caldeiras, tubagens de distribuição de vapor, de condensados, de água quente ou refrigerada, ou de termofluido) é uma medida de implementação simples que, pelo reduzido investimento que habitualmente envolve, deve merecer uma atenção imediata por parte das empresas.

O isolamento térmico cria uma barreira térmica que permite reduzir a transferência de calor. A utilização de isolamentos térmicos permite:

- Reduzir os custos de energia, ao minimizar as perdas de calor;
- Controlar a condensação;
- Fornecer protecção para o frio;
- Fazer a protecção aos equipamentos;
- Controlar as temperaturas de processo;
- Proteger contra o fogo;
- Servir de isolamento acústico.

As tubagens de vapor, de água quente, de termofluido e de condensados devem ser isoladas termicamente para evitar perdas. Um isolamento correcto pode economizar até 10 % do combustível utilizado para gerar a energia térmica transportada pela tubagem.

Perdas térmicas por radiação em caldeiras

As perdas de calor por radiação nas caldeiras modernas são, nos melhores casos, cerca de 1 % do poder calorífico inferior do combustível utilizado. No entanto, estas perdas podem atingir os 10 % nas caldeiras que possuam um isolamento deficiente e/ou um projecto desactualizado. Como as perdas por radiação são difíceis de medir, normalmente são incluídas nas perdas não especificadas. Esta classificação leva a que as perdas por radiação sejam adicionadas a outras menos importantes, podendo camuflar o problema e dando a falsa impressão de que as perdas por radiação são desprezáveis.

Redes de distribuição de vapor e de água quente

Numa rede de distribuição de vapor ou de água quente, toda a tubagem e válvulas contendo vapor ou condensado devem ser isoladas termicamente e protegidas do ambiente. Deve ser implementada uma rotina de inspecção periódica do isolamento térmico das tubagens e válvulas. Esta rotina deve também dar especial atenção aos equipamentos e aos troços de tubagem que tenham sofrido reparação ou manutenção recente, providenciando a substituição imediata do isolamento se tal for necessário. Além disso, na troca do revestimento isolante deve recalcular-se a espessura económica do mesmo, de modo a evitar-se o sobredimensionamento da espessura do isolamento. Se estas medidas forem aplicadas a grandes áreas de tubagem podem levar a economias consideráveis.

A magnitude dos desperdícios de energia associados à falta de isolamento térmico ou a um isolamento degradado é bem representada pelos dois exemplos seguintes [35]:

Exemplo 1 - Se uma tubagem com 100 mm de diâmetro nominal, transportar vapor a uma pressão de 8,6 bar e possuir 10 flanges não isoladas, verificam-se perdas térmicas através das suas paredes equivalentes a 2450 m^3 N/a de gás natural (aproximadamente 93 GJ/a ou 2,2 tep/a).

Exemplo 2 - Uma tubagem de vapor sem isolamento, com 100 mm de diâmetro nominal e 3 m de comprimento, desperdiça por ano o equivalente a mais de duas vezes o custo necessário para isolar a mesma tubagem com lã de rocha e revestimento exterior em alumínio. Ou seja, neste caso: Perdas térmicas/ano> 2 × Investimento para efectuar o isolamento.

De facto, normalmente o investimento no isolamento de tubagens de grande diâmetro tem um *payback* de poucas semanas, enquanto o isolamento de tubagem de menor diâmetro paga-se em alguns meses.

2.1.4.6 Transportes [11]

Numa instalação fabril existem múltiplos sistemas de transporte. De facto, no que diz respeito aos sistemas de transporte de matérias-primas, combustíveis e produtos acabados (p.ex., correias transportadoras, elevadores e empilhadores), deverá ser feita uma análise à optimização das cargas e à optimização de motores eléctricos.

Para diminuir o consumo de combustível nas frotas de transporte, as seguintes boas práticas são recomendadas:

- Implementar um sistema de gestão de combustível;
- Monitorizar a gestão do combustível através de:
    - Registo regular dos consumos;
    - Relacionar o consumo com o trabalho efectuado;
    - Identificar padrões a atingir e informar os condutores do seu desempenho;
    - Tomar acções para reduzir o consumo de combustível.
- Motivar e formar os condutores.

2.1.4.7 Formação e sensibilização de recursos humanos

A formação e a sensibilização dos recursos humanos são essenciais para a boa implementação da maioria das medidas de economia de energia. Um operador responsável por um equipamento deve estar suficientemente informado e formado para manter esse equipamento a funcionar em condições óptimas, sem descurar a sua segurança. O treino, formação e motivação dos recursos humanos deve ser uma parte integrante de um sistema eficiente de gestão de energia e deve ocorrer em todas as situações em que são introduzidas novas tecnologias no processo produtivo.

As empresas deverão realizar acções de sensibilização e formação que se centralizem nos seguintes temas:

- Os impactos ambientais da utilização da energia;
- Os benefícios da economia de energia;
- A dependência energética da empresa e o que esta pode fazer para economizar energia;
- Qual a atitude cívica individual para economizar energia.

Um exemplo concreto está relacionado com a operação de caldeiras. O emprego de mão-de-obra de nível excessivamente baixo em instalações consumidoras intensivas de energia (p.ex. caldeiras) é uma atitude errada, representando uma falsa economia. Deve certificar-se de que os operadores conhecem os procedimentos operacionais correctos. De facto, o investimento em cursos para operadores de caldeira é uma medida com muito baixo tempo de retorno do investimento efectuado.

2.1.4.8 Redução da energia reactiva

A energia reactiva é intrínseca a equipamentos eléctricos que possuam cargas indutivas (transformadores, motores eléctricos, etc.), sendo responsável pela diminuição do factor de potência (cos φ) desses equipamentos (ver Fig. 2.27 (A) e (B)). Como a nível industrial, a grande maioria dos equipamentos eléctricos são deste tipo, a redução da potência reactiva dos mesmos permite a obtenção de poupanças eléctricas através do aumento do factor de potência (ver Fig. 2.27 (C)). Algumas medidas práticas para se atingir este objectivo são as seguintes [36]:

- Instalar bancos de condensadores adicionais e melhorar a distribuição dos bancos de condensadores já instalados;
- Evitar a operação de motores sem carga ou com cargas muito abaixo do óptimo;
- Substituir motores convencionais por motores de alta eficiência energética, e manter estes a operar perto da sua capacidade (carga) óptima.
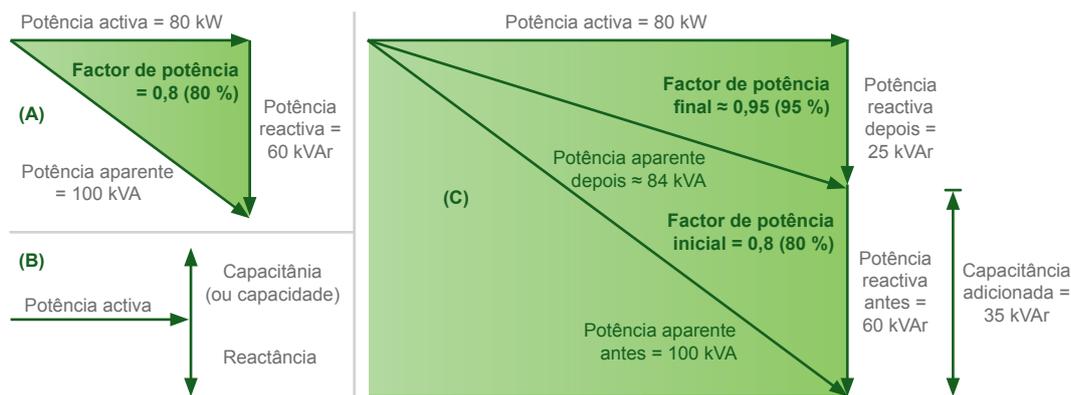
Fig. 2.27/ Definição de potência activa, potência reactiva, potência aparente e factor de potência (A). Efeito da capacitância na potência reactiva (B): diminuição da potência reactiva através da instalação de condensadores (C). Fonte: [36].

2.2 MEDIDAS SECTORIAIS ESPECÍFICAS

Para além das Medidas Transversais já apresentadas no capítulo precedente e que se aplicam à generalidade das instalações industriais, existem Medidas que se podem aplicar de forma específica a alguns dos mais importantes subsectores industriais.

Embora o respectivo impacto no conjunto da economia portuguesa seja obviamente bastante menor do que o obtido a partir das Medidas Transversais, o seu impacto sectorial, nomeadamente em termos de competitividade com unidades industriais similares instaladas noutros países, reveste-se da maior importância para as empresas industriais directamente envolvidas.

Assim, o presente capítulo visa também, e para além de dar uma perspectiva estratégica das evoluções tecnológicas em curso a todos os responsáveis industriais, dar uma ferramenta adicional de informação a todos os técnicos sectoriais que directamente lidem com as questões da eficiência energética.

2.2.1 ALIMENTAÇÃO E BEBIDAS

2.2.1.1 Optimização da esterilização

Esterilização por feixe de electrões [22]

A esterilização por feixe de electrões envolve a exposição de alimentos a um feixe de radiação ionizante, com energia suficiente para arrancar electrões das camadas exteriores dos átomos, criando assim iões e radicais livres que provocarão a destruição de bactérias e outros organismos patogénicos. No âmbito da melhoria de processos, a utilização desta técnica na indústria alimentar é altamente recomendada pelo *American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE)* [37].

A esterilização por feixe de electrões começou a ser utilizada na indústria alimentar depois de resolvidos os problemas associados à baixa capacidade de penetração e à complexidade do equipamento. Esta técnica permite uma poupança de energia de 90 % em relação à pasteurização clássica (onde os fluidos, p.ex., leite, são aquecidos em permutadores de placas até 72 ºC durante 15 segundos, seguidos de um arrefecimento brusco até 7 ºC). Outra vantagem é a sua aplicação na esterilização de produtos alimentares sensíveis à temperatura e que não podem ser pasteurizados (p.ex., carnes, frutos e vegetais).

Esterilização com autoclave horizontal [16]

Esta medida consiste em substituir os tradicionais esterilizadores com autoclave vertical por esterilizadores com autoclave horizontal, mais eficientes. Existem dois tipos de esterilizadores com autoclave horizontal:
- Esterilizadores de latas e recipientes metálicos que utilizam vapor e pequenos volumes de água;
- Esterilizadores de garrafas e frascos de vidro com inundação de água.

Estes equipamentos consomem entre 300 a 420 kg de vapor por tonelada de produto e possuem elevados rendimentos energéticos.

Substituição de máquinas acondicionadoras sem isolamento térmico adequado [16]

Esta medida consiste em substituir as máquinas acondicionadoras sem isolamento térmico por acondicionadoras devidamente isoladas. A utilização de máquinas acondicionadoras com isolamento interior de politetrafluoretileno (PTFE), comercialmente conhecido por Teflon®, permite a diminuição das perdas térmicas e por isso uma consequente redução do consumo energético. Outras vantagens desta acção são a poupança extra de 20 % no consumo energético do motor e a supressão da limpeza associada ao acondicionamento, uma vez que o revestimento em PTFE evita a deposição de matéria nas superfícies.

2.2.1.2 Processos de separação com membranas [22][21]

Na indústria alimentar e de bebidas, os processos de membranas são usados para concentrar, fraccionar e purificar produtos.

Os processos de membranas usualmente utilizados são quatro: osmose inversa (OI), nanofiltração (NF), ultrafiltração (UF) e microfiltração (MF). Outros processos de membranas são também utilizados, mas com menor frequência, p.ex., electrodiálise (ED), permeação gasosa (PG) e pervaporação (PV). A Tabela 2.11 apresenta uma lista de possíveis aplicações de processos de membranas em vários sectores da indústria alimentar e de bebidas.

No ano 2000, o sector alimentar já representava 40 % do mercado de membranas nos EUA [22]. Os processos de membranas reduzem drasticamente ou totalmente a energia térmica necessária associada aos processos tradicionais de filtração, separação e evaporação, e aumentam a recuperação de produtos secundários [37]. No entanto, o consumo de energia eléctrica cresce com o aumento das necessidades de bombagem.
A principal barreira à implementação dos processos de membranas na indústria alimentar é a colmatação irreversível das membranas. Este fenómeno leva à diminuição da produtividade, à perda de eficiência de separação e à diminuição do tempo de vida das membranas. A substituição frequente das membranas de um processo tem custos elevados, no entanto, com a evolução tecnológica e a aplicação de boas práticas, a durabilidade das membranas actuais ultrapassa facilmente os 10 anos.

A aplicação de processos de membranas na indústria alimentar pode levar a poupanças energéticas consideráveis e a períodos de retorno na ordem dos 3,5 anos [16].

Tabela. 2.11/ Possíveis aplicações de processos de membranas em vários sectores da indústria alimentar e de bebidas [21] [22]

Sector	Aplicações	Processo de membranas
Lacticínios	Concentração de soro.	OI
	Concentração de leite.	OI
	Dessalinização de soro.	ED / NF
	Fraccionamento de proteínas.	UF
	Concentração de ovo e clara de ovo.	UF
	Tratamento de águas residuais.	UF / NF
Moagem de cereais	Recuperação e reutilização de águas residuais.	UF
	Recuperação de produtos secundários existentes em águas residuais.	UF
Bebidas	Estabilização da cerveja a frio.	MF
	Clarificação de vinho.	UF
	Desalcoolização de cerveja e vinho.	OI
	Pré-tratamento da água.	OI
	Tratamento de sumo de citrinos.	OI
	Tratamento de águas residuais.	OI / NF
Óleos e gorduras alimentares	Tratamento de águas residuais.	OI / NF
Açúcar	Pré-concentrado de soluções de açúcar diluídas.	UF
	Concentração de melaço.	UF
	Recuperação de açúcar de águas de lavagem.	UF / OI
Frutas e Vegetais	Concentração de sumos.	UF / OI
	Concentração de aromas.	UF / OI
	Tratamento de águas residuais.	OI / NF

2.2.1.3 Mudança de moinhos horizontais para verticais [16]

A substituição de moinhos de martelo de eixo horizontal por moinhos de martelo de eixo vertical tem várias vantagens. A vantagem principal é a obtenção de uma maior economia de energia associada a uma maior produção por unidade de potência instalada. Esta economia energética, que varia entre os 40 e os 70 %, não acarreta aumentos nos custos de manutenção. Outras vantagens dos moinhos verticais são:

- Baixo aquecimento do produto e baixa perda de humidade;
- Possibilidade de trabalhar sem sistemas de filtragem;
- Obtenção de uma granulometria mais homogénea;
- Montagem fácil.

2.2.1.4 Destilação sob vácuo [16][38]

A destilação sob vácuo é uma tecnologia relativamente simples e robusta que reduz o consumo de energia térmica pelo facto da evaporação ocorrer a uma temperatura de ebulição mais baixa, sendo o calor residual aproveitado para utilização noutras etapas do processo produtivo. De facto, a destilação sob vácuo funciona com uma fracção dos custos energéticos da destilação convencional à pressão atmosférica. Como a destilação sob vácuo ocorre a temperaturas perto da temperatura ambiente, esta tecnologia é também conhecida como destilação a baixa temperatura.

Para além da economia energética, a destilação sob vácuo tem duas grandes vantagens adicionais: elimina o problema da formação de depósitos nas tubagens que ocorre nos processos a alta temperatura (p.ex., destilação convencional, destilação atmosférica) e preserva os produtos que se degradam a temperaturas mais elevadas.

2.2.2 CERÂMICA

2.2.2.1 Optimização de fornos e de secadores

Melhorias na concepção e no funcionamento de fornos e secadores

Para se aumentar a economia energética de fornos e secadores, as medidas que se apresentam de seguida podem ser usadas individualmente ou em conjunto [12][17]:

- Controlo automático do forno/secador, incluindo as condições de operação (temperatura e humidade);
- Nos secadores, instalar ventiladores nas zonas com contribuições térmicas independentes, de modo a se atingir a temperatura necessária;
- Tornar os fornos mais estanques;
- Melhorar o isolamento térmico de fornos através da aplicação de uma camada refractária interna ou de uma camada externa de fibras cerâmicas;
- Diminuir as perdas térmicas na entrada e na saída dos fornos;
- Utilizar queimadores de alta velocidade para aumentar a eficiência da queima e a transferência de calor (promotores de turbulência);
- Substituição de fornos túnel por fornos de rolos;
- Substituição de secadores verticais por secadores horizontais, uma vez que os segundos têm ciclos de secagem mais curtos que os primeiros (10 - 20 minutos e 50 - 60 minutos, respectivamente);
- Optimização da recirculação do ar dos secadores;
- Controlo automático dos regimes de combustão em forno;
- Optimização da passagem entre o secador e o forno, incluindo a utilização da zona de pré-aquecimento do forno para terminar a secagem;
- A redução do fluxo de ar nos fornos rotativos durante a produção de agregados de argila expandida pode levar a economias energéticas.

Recuperação de calor em fornos[12]

Actualmente, muitos secadores usados na indústria cerâmica utilizam ar quente recuperado da zona de arrefecimento dos fornos. Este ar quente tem temperaturas relativamente baixas, o que significa que o calor recuperado tem que ser utilizado numa zona do processo que se encontre fisicamente perto do forno, de modo a que as perdas térmicas nas tubagens sejam minimizadas. Em todo o caso, é sempre necessário que as condutas que transportam o calor recuperado se encontrem isoladas. O funcionamento dos secadores deverá verificar-se em simultâneo com o dos fornos de onde é recuperada a energia térmica e as economias de energia verificam-se na operação de secagem.

A recuperação do excesso de calor existente na zona de arrefecimento de um forno e a sua utilização sob a forma de ar quente é um procedimento que pode ser aplicado a todos os subsectores da indústria cerâmica que usem secadores.

Utilização de fornos de rolos[22]

O tipo de forno mais usado actualmente na indústria cerâmica de barro vermelho (telhas e tijolos) e na de louça sanitária é o forno túnel, com ciclos de produção entre as 10 e as 50 horas, sendo constituído por 3 zonas: pré-aquecimento, queima e arrefecimento. O forno de rolos permite em geral um tempo de cozedura com curvas de aquecimento mais reduzidas. Por exemplo, na indústria de pavimentos e revestimentos um forno de rolos apresenta tipicamente tempos de cozedura de 50 - 60 minutos (monoporosa ou monocozedura rápida), podendo chegar aos 75 ou 90 minutos (no caso da bicozedura rápida).

O volume de gás de escape é também menor, diminuindo não só a utilização de calor mas também o consumo energético para a circulação de ar. Normalmente, o custo de aquisição de um forno de rolos é inferior ao de em forno túnel.

Este tipo de forno apresenta como principais vantagens, a redução do tempo de cozedura em cerca de 90 %, a redução de efluentes gasosos e dos consumos de energia (térmica e eléctrica), e a diminuição dos custos de investimento e de manutenção. Em contrapartida esta tecnologia é ainda pouco usada na produção de tijolos e telhas, embora já francamente implementada na produção de revestimentos, de pavimentos e de louças sanitárias.

2.2.2.2 Extrusão com vapor[12][17]

A injecção de vapor de baixa pressão no amassado de pasta de equipamentos de extrusão facilita a saída do material extrudido e permite o melhor controlo do teor de humidade deste. Efectivamente, a utilização de vapor de água a uma pressão de aproximadamente 4 bar leva a que a extrusão ocorra com menos água (no amassado da fieira), o que se repercute em menores consumos energéticos na secagem (a jusante), em virtude da menor humidade da peça e da sua maior temperatura. Além disso, como a diminuição da quantidade de água produz um aumento da plasticidade do material, consegue-se uma diminuição adicional do consumo eléctrico no funcionamento da máquina extrusora, sendo típicas economias entre 10 e 20 %. Outra vantagem da extrusão com vapor reside no menor número de roturas que se verifica na secagem, como consequência da menor humidade inicial e da maior facilidade de secagem.

2.2.2.3 Extrusão dura[17]

As máquinas extrusoras utilizadas na extrusão dura têm a capacidade de operar a maiores pressões que as tradicionais e conseguem dar forma a peças cerâmicas com menores teores de humidade que o processo tradicional (17 - 23 %). Esta tecnologia faz com que o uso de secadores seja praticamente desnecessário, uma vez que a secagem pode ser feita num forno com a fase de pré-aquecimento ampliada. Embora a extrusão dura tenha um consumo eléctrico mais elevado que a extrusão convencional, a economia térmica no processo de secagem é suficiente para que o resultado do balanço global seja favorável à sua escolha.

Esta tecnologia é especialmente aconselhada para a produção de peças de cerâmica em que a secagem é difícil, e portanto, energeticamente dispendiosa.

2.2.2.4 Optimização de produção de pó para prensagem[12][17]

A produção de pó atomizado é um passo processual importante em alguns subsectores da indústria cerâmica, sendo de salientar a sua importância na produção pavimentos e revestimentos.

O pó cerâmico é obtido em resultado de um conjunto de operações de preparação das matérias-primas (moagem, peneiração, homogeneização e atomização de pasta). Após as primeiras moagens das matérias-primas obtêm-se partículas com tamanhos iguais ou superiores a 2 mm. Para se conseguirem tamanhos de partículas menores, é necessária a utilização de moinhos de rolos e de moinhos de bolas.

Os moinhos de bolas são normalmente utilizados na indústria de pavimentos e revestimentos, e quando operam por via húmida, podem conduzir após uma operação de atomização à obtenção de pó cerâmico com tamanho abaixo de 200 mícrones (µm). O revestimento das paredes internas dos moinhos de bolas com uma superfície elástica (p.ex., borracha) permite a obtenção de um melhor rendimento na moagem, diminuindo o tempo de moagem e reduzindo o consumo de energia eléctrica.

A moagem por via seca e granulação consiste num processo de moagem das matérias-primas, com recurso a trituradores de rolos cónicos, que permite a obtenção de granulometrias comparáveis às conseguidas com moagem por via húmida (em moinhos de bolas), seguido de uma operação de peneiração e de introdução do material moído (pó) num granulador. Aí, o pó é misturado com água finamente pulverizada para elevar a sua humidade até 10 - 11 % e submetido a um processo de aglomeração, graças ao movimento rotacional a que é submetido por esse equipamento. À saída deste, o pó é seco até uma humidade apropriada num secador de leito fluidizado.

As vantagens que apresenta relativamente ao processo de preparação de pasta por via húmida seguido de atomização são: economias de energia eléctrica (aprox. 20 %) e de energia térmica (aprox. 65 %); eliminação da necessidade de defloculantes; redução de custos de mão-de-obra e de manutenção; e, redução (de cerca de 60 %) do consumo específico de energia.

2.2.2.5 Utilização de combustíveis alternativos[17]

A utilização de combustíveis gasosos e líquidos (gás natural, gás natural liquefeito (GNL), gás de petróleo liquefeito (GPL) e fuelóleo), em vez de combustível sólido ou de fuelóleo pesado, resulta numa queima mais eficiente e na eliminação quase total da emissão de partículas de fuligem. A substituição dos combustíveis sólidos por combustíveis líquidos ou gasosos tem vantagens variadas, das quais se destacam a diminuição das emissões de dióxido de carbono (CO_2) e dióxido de enxofre (SO_2) e a diminuição da produção e emissão de cinzas, evitando a necessidade de gastos energéticos num sistema de remoção de cinzas dos gases de combustão.

Neste campo, a transformação de instalações consumidoras de combustíveis sólidos ou de fuelóleo pesado em instalações consumidoras de gás natural é a medida com potencial de economia energética mais elevado. Para além da vantagem energética, a utilização de gás natural gera melhorias na produtividade e na qualidade dos produtos. As economias energéticas térmicas e eléctricas que se conseguem com esta medida centram-se nas operações de secagem e são função das tecnologias de combustão empregues e das características do combustível.

O consumo de energia térmica nas operações de secagem diminui em 30 % devido à aplicação de queimadores mais eficientes e à utilização directa dos gases de combustão na secagem. Nos fornos, a utilização de queimadores mais eficientes alimentados a gás natural (p.ex., queimadores de alta velocidade) leva a diminuições do consumo energético de 5 % devido ao aumento da produção. Com o uso de gás natural, o consumo de energia eléctrica diminui em cerca de 2 % devido à eliminação das seguintes operações:

- Bombagem associada aos combustíveis líquidos;
- Aquecimento de fuelóleo para que este possa ser bombeado;
- Moagem associada aos combustíveis sólidos.

A substituição de combustíveis fósseis por combustíveis de origem não-fóssil (p.ex., biocombustíveis, solventes, resíduos orgânicos) é também uma alternativa viável para a redução da quantidade de energia primária necessária e a diminuição das emissões globais efectivas de dióxido de carbono (CO_2).

2.2.3 CIMENTO

2.2.3.1 Optimização de fornos

A produção de cimento pode utilizar vários tipos de fornos e pode basear-se em vários processos principais (via seca, via húmida, via semi-seca e via semi-húmida), dependendo do teor de água existente na alimentação de matéria-prima. O processo de via húmida é mais vantajoso quando as matérias-primas se encontram húmidas e permite um controlo mais fácil da química da mistura. Apesar destas vantagens, este processo precisa de evaporar grandes quantidades de água antes de se aquecer a mistura até à temperatura de calcinação. O processo de via seca não necessita de evaporar água em excesso e por isso consome menos energia [24].

Dos quatro processos principais de produção de cimento, em Portugal apenas se utilizam os processos de via seca (em 11 linhas de produção) e de via semi-seca (apenas uma linha de produção e produzindo, especificamente, cimento branco) [39].

Os fornos usados na indústria cimenteira são, na sua maioria, fornos verticais ou rotativos. Os fornos rotativos são mais eficientes que os verticais e actualmente têm uma boa eficiência energética. O desempenho superior dos fornos rotativos faz com que se mantenham como a melhor tecnologia de calcinação disponível nas próximas décadas [24].

O documento BREF da Indústria Cimenteira [13] (actualmente em revisão) considera que, em termos gerais, a Melhor Técnica Disponível (MTD) em termos energéticos consiste numa linha de produção operando em via seca, com 5 etapas de pré-aquecimento e uma pré-calcinação antes do forno rotativo. Dependendo da configuração inicial das linhas, o *revamping* de uma linha de produção para esta configuração poderá permitir economias de energia até 126 MJ/t de clínquer (cerca de 4 % do consumo específico de energia total), muito embora este *revamping* (melhoramento) só seja viável se estiver integrado num projecto com vista ao aumento de produção do forno.

Outras medidas que diminuem o consumo de energia primária são a aplicação de arrefecedores de clínquer de última geração e a recuperação do excesso de calor nos gases de escape do forno. Este excesso de calor recuperado do forno é usado em operações de secagem e processos de pré-aquecimento [13]. Uma vez mais, note-se que as especificidades deste tipo de procedimento, já descritas no tópico 2.2.2.1, devem ser tidas em conta para que o calor recuperado seja devidamente aproveitado.

A optimização do processo de calcinação do clínquer, com vista à redução do consumo de calor, produz também melhorias na qualidade do clínquer e aumenta o tempo de vida do equipamento [13].

As reduções nas emissões de dióxido de enxofre (SO_2), de óxidos de enxofre (NO_X) e de poeiras são um efeito secundário positivo desta optimização. Sucintamente, esta optimização é conseguida através de várias medidas, entre as quais se destacam as seguintes [13]:

- Boa homogeneização das matérias-primas;
- Doseamento uniforme do combustível (uso de sistemas modernos de alimentação de combustível sólido);
- Melhoramento do desempenho do arrefecedor de clínquer.

Em suma, os objectivos da optimização dos fornos de calcinação são a redução dos custos operacionais associados aos combustíveis e à manutenção, o aumento da produtividade e o aumento da qualidade do clínquer. As medidas de optimização referidas podem ser aplicadas a todos os tipos de fornos [13].

2.2.3.2 Optimização de moagens [13]

Na indústria cimenteira, os moinhos usados na moagem das matérias-primas, adições minerais e produto final (cimento) são os principais consumidores de energia eléctrica. Estes equipamentos, juntamente com os ventiladores de exaustão utilizados nos fornos e nos moinhos de cimento, correspondem a mais de 80 % do consumo total de electricidade. Assim, a utilização de equipamento de moagem altamente eficiente em termos de consumo energético e a instalação de sistemas de gestão de energia são medidas que fazem parte das melhores técnicas disponíveis para a produção de cimento.

Moagem das matérias-primas

Nos processos de via seca e semi-seca (os únicos utilizados em Portugal), a granulometria e distribuição de tamanhos das partículas do produto da moagem das matérias-primas (cru) são aspectos muito importantes para a eficiência do processo de calcinação subsequente. Assim, a optimização da moagem inclui o melhoramento do separador usado na classificação do cru. Os separadores de nova geração do tipo *rotor cage* são os mais eficientes, possuindo as seguintes vantagens:

- Menor consumo específico de energia do sistema de moagem (mais eficaz a evitar a moagem excessiva);
- Aumento da produtividade/eficiência da separação;
- Maior flexibilidade no ajuste da granulometria do produto, permitindo um melhor controlo da distribuição de tamanho das partículas, e consequentemente, a obtenção de um produto mais uniforme.

Moagem do cimento

O processo de moagem do cimento que é utilizado numa unidade industrial depende do tipo de cimento produzido, no entanto, a grande maioria dos moinhos trabalha em circuito fechado. Para que o sistema de moagem seja altamente eficiente em termos energéticos, é muito importante que o doseamento dos vários componentes da alimentação do moinho seja preciso e estável de modo a garantir uma composição de alimentação o mais uniforme possível.

Devido à variedade de tipos de cimentos produzidos, os sistemas de moagem de última geração equipados com separadores dinâmicos são os mais utilizados. Os separadores de nova geração do tipo *rotor cage* também são os mais utilizados no processo de moagem do cimento devido à sua eficiência e vantagens adicionais e devido ao arrefecimento do cimento durante a moagem que se consegue nestes separadores. A utilização de prensas de rolos e o melhoramento de revestimentos interiores de moinhos poderão também aumentar a eficiência energética da moagem.

2.2.3.3 Utilização de combustíveis alternativos

A substituição de combustíveis fósseis não renováveis por combustíveis alternativos poderá reduzir os custos com os combustíveis e as emissões de dióxido de carbono (CO_2), nomeadamente no caso da utilização de combustíveis neutros em termos de emissões de CO_2 (ex: biomassa). Simultaneamente, esta medida proporciona à sociedade um serviço, uma vez que permite a destruição de resíduos através da sua valorização energética e permite reduzir a importação de combustíveis fósseis, substituindo a sua utilização pela de combustíveis endógenos.

O emprego de combustíveis alternativos na produção de cimento é actualmente uma prática bastante comum e é uma técnica utilizada há mais de 12 anos pela maior parte dos países desenvolvidos (Alemanha, França, Japão, EUA, *etc.*).

Em 2004, cerca de um terço de todos os fornos instalados já utilizavam combustíveis alternativos, correspondendo estes a mais de 10 % da totalidade de combustível utilizado na indústria cimenteira da UE [17]. No caso específico da Alemanha, o consumo de combustíveis alternativos atingiu os 38 % no ano 2003 [24]. De facto, a substituição de fontes de energia primárias por combustíveis alternativos tem a vindo a crescer, e em algumas regiões já corresponde a mais de 50 % do total.

Os combustíveis alternativos usados na indústria cimenteira são essencialmente resíduos e subprodutos industriais ou urbanos, dos quais se destacam os seguintes:

- Pneumáticos usados;
- Óleos usados (ainda não autorizados em Portugal);
- Resíduos industriais de madeira e serradura;
- Resíduos florestais (biomassa);
- Farinhas animais;
- Solventes, tintas e vernizes (ainda não autorizados em Portugal).

A penetração desta medida em Portugal é neste momento baixa, apenas porque a sua total aplicação não depende apenas da vontade da indústria mas também dos pareceres de outras entidades licenciadoras, nomeadamente das autoridades autárquicas. É de salientar que o aumento da utilização destes combustíveis alternativos se reverte da maior importância para reduzir os custos energéticos globais relativos à produção de cimento em Portugal.

2.2.3.4 Redução da utilização de clínquer no cimento[13]

A redução da percentagem de clínquer presente no cimento (razão clínquer/cimento) é uma medida que diminui a quantidade de combustível necessária à produção de uma tonelada de cimento e reduz a emissão de gases associada a essa produção. Para diminuir a razão clínquer/cimento na produção de vários tipos de cimento, o clínquer pode ser parcialmente substituído por adições de outros materiais, com propriedades físico-químicas adequadas, tais como: escórias provenientes da indústria siderúrgica, cinzas volantes provenientes de centrais termoeléctricas, componentes calcários e materiais pozolânicos. Estes materiais são adicionados durante o processo de moagem do cimento. A percentagem de incorporação de clínquer é essencialmente condicionada pelas características destes materiais adicionados e não por nenhuma técnica específica de aplicação; por isso mesmo, o limite da sua incorporação está estabelecido na norma harmonizada NP EN 197-1.

Na Europa, a percentagem de clínquer no cimento situa-se, em média, nos 80 - 85 %, enquanto em Portugal esta percentagem é mesmo inferior a 80 %, sendo a sua evolução dependente das condicionantes de mercado e da qualidade e quantidade dos materiais cimentícios disponíveis.

2.2.3.5 Utilização de gás natural

Como já foi referido, na indústria cimenteira são utilizados vários tipos de combustível. Em termos de combustíveis fósseis primários, os mais utilizados são (ordem decrescente em termos de quantidades utilizadas) [13]:

- Combustíveis sólidos pulverizados (carvão e coque de petróleo);
- Fuelóleo pesado;
- Gás natural.

O principal entrave à utilização de gás natural é o seu preço, no entanto, esta opção tem vantagens que a podem tornar bastante competitiva. A vantagem principal é a menor emissão de gases com efeito de estufa em comparação com outros combustíveis. Enquanto que o coque de petróleo e o carvão sub-betuminoso têm taxas de emissão por unidade de energia produzida na ordem dos 97,5 e 96 kg CO_2e/GJ, respectivamente, o gás natural tem taxas de emissão de aproximadamente 64 kg CO_2e/GJ. Esta redução nas emissões de dióxido de carbono (CO_2) associadas à queima do combustível permite que uma unidade industrial reduza os custos em termos de licenças de emissão.

A utilização de gás natural requer cuidados de segurança e de preparação adicionais. Antes da combustão, a pressão do gás tem que primeiro baixar da pressão de *pipeline* (30 - 80 bar) até à pressão de rede da unidade industrial (3 - 10 bar), para depois baixar de novo até à pressão de alimentação dos queimadores (cerca de 1 bar). Na primeira redução de pressão, o gás natural tem que ser pré-aquecido antes da válvula de redução de modo a evitar o congelamento do equipamento devido ao efeito de Joule-Thompson [13]. Uma alternativa ao procedimento acabado de descrever consiste na utilização de uma turbina de expansão de gás para efectuar a redução de pressão do gás natural. Esta alternativa, energeticamente mais eficaz do que a anterior pois permite a produção de electricidade através de um gerador eléctrico acoplado à turbina de expansão, deverá ser analisada de modo a verificar a sua viabilidade económica [13].

2.2.4 MADEIRA E ARTIGOS DE MADEIRA

2.2.4.1 Transportadores mecânicos em vez de pneumáticos [18]

Uma importante parcela da energia eléctrica gasta pela indústria da madeira e dos artigos de madeira é dispendida nos sistemas de transporte de matérias-primas e produtos intermediários dentro da unidade industrial. Nas unidades industriais que possuam transportadores pneumáticos, a substituição destes por transportadores mecânicos de parafuso helicoidal que são energeticamente mais eficientes, leva a uma diminuição do consumo de energia.

2.2.4.2 Aproveitamento de subprodutos de biomassa [40]

A construção de centrais de biomassa é uma medida muito interessante tendo em conta a necessidade de valorização energética dos resíduos produzidos pela exploração florestal e pela própria indústria da madeira e dos artigos de madeira. Estes resíduos podem ser utilizados racionalmente na produção de energia.
A produção de electricidade a partir de biomassa é normalmente menos eficiente que a produção de electricidade a partir de outros combustíveis devido a um menor poder calorífico da biomassa, maior variabilidade do conteúdo em humidade e maior heterogeneidade na composição da biomassa.
A eficiência das centrais de biomassa que apenas produzem electricidade encontra-se tipicamente abaixo dos 35 %. Nas centrais de cogeração alimentadas a biomassa utiliza-se o calor gerado para produção de electricidade, enquanto que o calor remanescente é utilizado em processos industriais ou em aquecimento. A eficiência global destas centrais pode aproximar-se dos 80 %.

A utilização de biomassa florestal em sistemas de cogeração de calor e electricidade apresenta maiores eficiências globais que a simples produção de energia eléctrica. Assim, o uso de biomassa para produção de energia deve ser feito, prioritariamente, em centrais de cogeração, sendo que no caso específico de Portugal a eficiente utilização de biomassa florestal para fins energéticos se reveste da maior importância estratégica devido às suas fortes implicações económicas e ambientais.

2.2.4.3 Implantação e optimização de estufas de secagem contínua [18]

A implantação de estufas de secagem contínua faz parte de uma medida mais geral: a substituição de estufas de secagem tradicionais e obsoletas por estufas de secagem de última geração. Estas últimas optimizam o processo de combustão e reduzem as perdas térmicas.

As estufas de secagem contínua consomem menos energia eléctrica e térmica que as estufas descontínuas. A substituição das estufas descontínuas permite uma economia energética importante devido ao facto de se evitar a carga e descarga dos materiais a secar e à maior facilidade na recuperação de energia térmica a partir dos gases de combustão.

2.2.5 METALO-ELECTRO-MECÂNICA

2.2.5.1 Combustão submersa para aquecimento de banhos [14] [19]

O aquecimento das soluções e emulsões de processo é um passo necessário em várias etapas do processamento de metais ferrosos, p.ex., aquecimento de banhos ácidos, separação de emulsões e evaporação/redução de águas residuais. Se existir gás combustível disponível ou se for necessária a produção preliminar de vapor para o aquecimento de um banho, a utilização da combustão submersa aumenta a eficiência térmica do processo.

A combustão submersa é uma técnica em que o aquecimento do banho ocorre com os queimadores de gás imersos no próprio banho. Este aquecimento pode ser efectuado com os gases de combustão em contacto directo ou indirecto com o líquido.

Para temperaturas abaixo de 70 ºC, o aquecimento directo é melhor. Como no aquecimento directo o rendimento energético diminui para temperaturas mais elevadas devido a maiores perdas por evaporação do líquido, o aquecimento indirecto é mais vantajoso para temperaturas superiores a 70 ºC.

As principais vantagens da combustão submersa são:

- Eliminação das perdas térmicas associadas ao transporte do fluido de aquecimento (vapor ou termofluido) desde a caldeira até ao banho;
- Técnica com menores custos de energia e de manutenção que o aquecimento dos banhos através de resistências eléctricas.

Com este tipo de aquecimento conseguem-se rendimentos energéticos entre os 80 e os 95 %, face aos 50 a 75 % dos sistemas convencionais [19].

As desvantagens desta técnica são essencialmente duas. Em primeiro lugar, a possível contaminação do banho com dióxido de carbono (CO_2), dióxido de enxofre (SO_2), óxidos de azoto (NO_X), *etc.*. Em segundo lugar, o possível arrastamento de vapor ou gotículas de líquido do banho pelos gases de combustão, levando à necessidade de tratamento destes gases antes da sua descarga para a atmosfera [14].

2.2.5.2 Reutilização de desperdícios

Na indústria metalo-electro-mecânica podem ser aplicadas várias técnicas com vista à recuperação e reutilização (reciclagem) de desperdícios provenientes dos processos de transformação metálica. Esta medida, ao reduzir as perdas de produto transformado, permite um maior aproveitamento energético por tonelada de produto, diminuindo o respectivo consumo específico de energia.

Para além da reutilização de desperdícios metálicos, é possível também a recuperação e reutilização de óleos, soluções, ácidos, lubrificantes e água utilizados nos mais variados processos. De uma forma sumária, a Tabela 2.12 apresenta uma lista das Melhores Técnicas Disponíveis (MTDs) para a recuperação e reutilização de desperdícios e de outros produtos na indústria dos metais ferrosos [14]. Os produtos recuperados podem ser reutilizados nas próprias unidades industriais ou podem ser vendidos e utilizados noutras indústrias (p.ex., indústria dos metais não-ferrosos).

Tabela. 2.12/ Melhores Técnicas Disponíveis (MTDs) para a reutilização de desperdícios e de utilidades na indústria dos metais ferrosos [14]

Técnica	Processo
Reutilização de desperdícios metálicos	
Reciclagem a nível interno ou venda para reciclagem de calamina, limalha de ferro e poeiras.	- Laminagem a quente: todos os processos de rectificação superficial.
Sistemas de exaustão com tratamento de ar extraído por meio de filtros de mangas de tecido e reciclagem das poeiras recolhidas.	- Laminagem a quente: trem de acabamento. - Laminagem a frio: desenrolamento de bobinas.
Reciclagem das aparas de aço e de ferro nas oficinas de laminagem.	- Laminagem a quente.
Reutilização dos resíduos contendo chumbo (Pb) na indústria dos metais não-ferrosos.	- Trefilagem: recozimento contínuo de fio com baixo teor de carbono e patentagem.
Recolha separada dos resíduos contendo zinco, escórias ou zinco duro, para reutilização na indústria de metais não-ferrosos.	- Galvanização contínua: imersão a quente.
Reaproveitamento das poeiras a nível interno ou externo (p. ex., para a produção de fundentes).	- Galvanização descontínua: imersão a quente.
Reutilização dos metais valiosos contidos nos resíduos de zinco (Zn) no sector dos metais não-ferrosos ou noutros sectores.	- Galvanização descontínua. - Revestimento de fio.
Reutilização de óleos, ácidos e água	
Separação de óleo da água de drenagem contaminada e reutilização do óleo recuperado.	- Laminagem a quente: armazenamento e manuseamento de matérias-primas e utilidades.
Tratamento e reutilização da água proveniente de todos os processos de rectificação de superfícies.	- Laminagem a quente.
Reutilização do ácido clorídrico (HCl) gasto na decapagem.	- Laminagem a frio.
Sistemas de lavagem em cascata com reutilização do caudal excedentário para minimização da água residual (p. ex., nos banhos de decapagem ou no sistema de lavagem de gases).	- Laminagem a frio.
Depuração e reutilização das emulsões de forma a prolongar a vida útil dos sistemas de emulsões.	- Laminagem a frio.
Circuito de desengorduramento com depuração e reutilização da solução desengordurante.	- Laminagem a frio.
Reutilização da fracção de óleo separada no desengorduramento (p. ex., em processos térmicos).	- Galvanização contínua: imersão a quente.
Depuração e reutilização das soluções de fosfatação e de passivação.	- Galvanização contínua: fosfatação e passivação.
Recuperação da fracção de ácido livre e reutilização deste na instalação de decapagem ou sob forma de matéria-prima secundária.	- Galvanização descontínua: decapagem + Separação. - Trefilagem: decapagem. - Revestimento de fio: decapagem.
Reutilização da água de lavagem para reabastecer os banhos de processamento precedentes.	- Galvanização descontínua: lavagem.
Depuração e reutilização do lubrificante usado no processo de trefilagem.	- Trefilagem por via húmida.
Reutilização da água de refrigeração como água de compensação para outras aplicações.	- Revestimento de fio.

2.2.5.3 Optimização de fornos

Concepção do forno [14]

A concepção do forno e o seu isolamento térmico são factores que afectam significativamente a eficiência térmica dos vários tipos de fornos usados nesta indústria (fornos de reaquecimento, de tratamento térmico e de recozimento).

Para além do equipamento necessário a uma produção eficiente e flexível, os fornos devem ser equipados com equipamento que limite o consumo energético e a emissão de gases em caso de paragem brusca da linha de produção. Este equipamento deve facilitar o arrefecimento do forno e permitir que os queimadores de certas secções sejam desligados. Por motivos de segurança, a implementação deste procedimento poderá levar à necessidade de purgas de azoto.

Para que os fornos tenham um desempenho optimizado, as seguintes recomendações devem ser tidas em consideração:

- Recuperação de calor dos gases de combustão para pré-aquecimento do material de alimentação;
- Colocação de queimadores radiantes no tecto, o que leva à diminuição das emissões de óxidos de azoto (NO_X). O retorno dos gases de combustão aos queimadores também influencia os níveis de emissão de NO_X;
- Aplicação de medidas que levem a um aumento do tempo de vida útil do material refractário. Estas medidas devem ser aplicadas durante a construção dos fornos;
- Utilização de materiais refractários com reduzida massa térmica, que se reflecte em menores perdas de energia e consequentemente em menores consumos de energia, além da diminuição do tempo de arranque do forno;
- Redução das entradas de ar parasita, através do melhoramento da estanquicidade do forno;
- Minimização do tamanho das portas de carga e descarga, e utilização de cortinas isoladoras de material refractário sempre que as portas estejam abertas.

Recuperação de calor [14]

A recuperação parcial do calor contido nos gases de combustão que saem do forno deve ter em consideração os seguintes princípios:

- Minimização das perdas energéticas associadas à exaustão dos gases para a atmosfera, com a prévia utilização destes em sistemas de recuperação de calor, nomeadamente na produção de vapor;
- Reciclagem/retorno dos gases ao forno.

As perdas energéticas são minimizadas se o forno possuir um elevado gradiente de temperatura ao longo do seu comprimento e se os gases que saem da extremidade mais fria forem usados para o pré-aquecimento das peças metálicas antes destas entrarem no forno. O aproveitamento do calor dos gases de combustão pode ser efectuado por via de qualquer dos seguintes sistemas de recuperação: queimadores regenerativos, queimadores recuperativos e recuperadores.

Operação e manutenção [14]

Em termos de operação, a utilização de sistemas de controlo apropriados permite controlar alguns parâmetros que afectam a eficiência energética do forno. Estes sistemas devem evitar a geração de turbulência nas chamas dos queimadores e devem controlar de uma forma precisa o excesso de ar dentro do forno. Este último parâmetro é muito importante já que afecta o consumo energético, a emissão de óxidos de azoto (NO_X) e a formação de depósitos. A utilização de um espectrómetro de massa permite controlar a razão ar/gás e mantê-la num nível óptimo mesmo quando não se conhece a composição do combustível.

Quando se empregam técnicas de redução do número de turno de funcionamento (p.ex., fins-de-semana) ou quando o forno é arrefecido para manutenção, as perdas de energia podem ser importantes. Assim, nestes casos as portas do forno devem, sempre que possível, ser fechadas e seladas para manter o calor.

A experiência industrial tem registado poupanças energéticas até 10 % quando um forno opera de forma correcta e tem uma manutenção periódica adequada.

Escolha do combustível [14][19]

A escolha do combustível depende da sua disponibilidade e da tarefa a desempenhar. Em termos de disponibilidade, e sempre que tal for possível, devem ser utilizados os gases combustíveis que são produtos ou subprodutos de outros processos da mesma unidade ou complexo industrial. Como exemplo, as indústrias metalo-mecânicas que se encontram integradas num complexo siderúrgico podem utilizar os gases combustíveis provenientes da coqueria, do alto-forno e do convertidor a oxigénio. Estes gases podem ser misturados com gás natural e a sua utilização deve ser maximizada. Esta medida não só provoca uma diminuição do consumo de energia primária exterior (gás natural) como também elimina a necessidade de queimar os gases na *flare*.

A escolha do tipo de forno ou do combustível a utilizar deve ter em consideração o tipo de tarefa a desempenhar. No entanto, a escolha de um determinado combustível depende sempre das constrições económicas e ambientais. Quando estes factores se alteram ou quando a evolução tecnológica torna competitivas algumas das opções postas de lado no passado, a hipótese de substituição do forno

ou do combustível deve ser considerada. Em Espanha, por exemplo, duas medidas indicadas como geradoras de poupança energética consistem na substituição de fornos já existentes por outros fornos alimentados de forma diferente. Essas duas medidas são :

- A substituição dos fornos alimentados a fuelóleo usados na forja (antes da formação das peças) por fornos eléctricos de indução de média frequência;
- A substituição dos fornos eléctricos de tratamento térmico por fornos alimentados a gás natural.

2.2.6 METALURGIA E FUNDIÇÃO

2.2.6.1 Melhoria da qualidade dos ânodos e dos cátodos [20]

A utilização de ânodos pré-cozidos produz melhorias na captação e depuração de gases e diminui o consumo de energia eléctrica das etapas electrolíticas.

Esta medida é especialmente aconselhada aos subsectores do alumínio e do zinco.

2.2.6.2 Outras medidas [41]

No âmbito do projecto "Estratégia de Desenvolvimento do Sector de Fundição", patrocinado pelo IAPMEI e implementado pela Associação Portuguesa de Fundição, em parceria com a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, o CINFU - Centro de Formação profissional da Indústria de Fundição, o CVR - Centro de Valorização de Resíduos, o CTCV - Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro, a QEnergia, a EDP Energia, e o INESC (pólo do Porto), implementaram-se três acções: Ambiente, *Benchmarking* e Energia.

Na acção Energia diagnosticou-se, com base numa amostra de 15 empresas, dez do sector de metais ferrosos e cinco do sector de metais não ferrosos, num universo estimado em 45 empresas (cuja principal actuação é a fundição de metais), as práticas, os consumos por grandes sectores - Fusão, Ar Comprimido, Despoeiramento e Outros, bem como a potência contratada e a sua taxa de utilização, numa metodologia de registo do consumo em contínuo durante 18 meses.

Os subsectores principais consumidores nas fundições são:

- Fusão, cerca de 75 % do consumo total;
- Ar Comprimido, cerca de 7,5 % do consumo global;
- Operações de tratamento de efluentes gasosos, cerca de 7,5 % do consumo global;
- Outros não especificados, 10 % do consumo global.

As operações de fundição caracterizam-se pela produção de ligas metálicas líquidas apropriadas ao fabrico de peças e pelo seu vazamento em cavidades de moldação, fabricadas num refractário (tipicamente areia de fundição ou um refractário como alumina ou gesso refractário) ou num molde metálico (típico da fundição injectada e fundição em coquilha).

Para o fabrico das peças há necessidade de introduzir o metal líquido por canais projectados de um dado modo, os gitos, e ainda são empregues alimentadores. Após vazamento e solidificação ficam os cachos, que são constituídos pelo gito, os alimentadores e os fundidos. Destes, só se podem vir a vender os fundidos. Os gitos e os alimentadores, embora necessários à realização do processo, são um excesso que pode vir a ser recuperado.

Nem todas os fundidos são vendáveis, porque podem ter deficiências dimensionais, de forma, estrutura ou outras. A taxa de rejeição, ou refugo, é variável consoante o tipo de fundido, tipo de liga, tamanho da série e experiência do fundidor, no fabrico desse tipo de peça. Tipicamente aponta-se para um valor médio de 5 %, mas pode baixar a 2 ou 3 % nas séries muito grandes, ou subir a 15 %, nas pequenas séries de peças muito complexas.
Genericamente falando, pode dizer-se que o consumo de energia numa fundição se verifica na secção de fusão, em motores de accionamento de diversos equipamentos, como os compressores, e em telas transportadoras, iluminação e aquecimento, entre outros.

Há certamente potencial para a redução do consumo energético, actuando ao nível de práticas do processo nas seguintes áreas:

- Sector da fusão: tipo de forno, preparação de cargas, sequência e forma de carregamento dos fornos, prática da fusão (temperatura de remoção de escória, colheita de amostra para controlo da composição química, correcções de composição), temperatura e tempo de sobreaquecimento;
- Aumento do número de fundidos por cavidade moldante, sempre que o processo o permita;
- Aumento do rendimento do metal vazado, por recurso a ferramentas de simulação;
- Diminuição da taxa global de refugo;
- Aumento da cadência do ciclo de produção, sempre que possível;
- Redução das sobreespessuras introduzidas nos fundidos, a partir do conhecimento do processo e da utilização de práticas que aumentem a sua fiabilidade dimensional.

2.2.7 PASTA E PAPEL

2.2.7.1 Gaseificação / Queima de licor negro e outros resíduos

Gaseificação de licor negro [22]

O licor negro que resulta da deslenhificação da estilha é normalmente queimado em caldeiras de recuperação, tendo o processo uma eficiência limitada devido ao baixo teor em sólidos do licor negro (65 - 75 %). A caldeira de recuperação gera vapor de baixa pressão.

Existem duas técnicas de gaseificação do licor negro:

- Baixa temperatura/fase sólida: ocorre à pressão atmosférica sobre leito fluidizado de carbonato de sódio, a uma temperatura igual ou inferior a 700 ºC (abaixo do ponto de fusão dos sais inorgânicos que constituem a maior parte da escória do licor negro);
- Alta temperatura/fase fundida: ocorre a pressões de 25 bar e a uma temperatura igual ou superior a 950 ºC (acima do ponto de fusão dos sais). Este processo leva a maiores taxas de conversão de carbono, mas tem igualmente maiores problemas de corrosão. O gás de síntese obtido é arrefecido (gerando vapor de baixa pressão) e limpo antes de entrar na turbina.

O gás combustível obtido na gaseificação é queimado em turbinas adaptadas à queima de um gás de poder calorífico inferior ao do gás natural. A quantidade de gases de combustão gerados pode ser tal que a energia eléctrica produzida cubra na totalidade as necessidades do processo e ainda seja possível vender excedentes para a rede de distribuição.

Mesmo tendo em consideração os custos energéticos da gaseificação e da compressão do gás gerado, a gaseificação de licor negro tem as seguintes vantagens:

- Aumenta significativamente a eficiência energética global da produção de pasta de papel;
- Reduz a quantidade de efluente líquido;
- Reduz a emissão de partículas e de óxidos de azoto (NO_X) nos gases de queima do licor negro;
- Reduz o risco de explosão.

2.2.7.2 Optimização de operações de secagem [22]

A produção de papel é dividida em quatro etapas básicas: 1) Formação, 2) Prensagem (remoção mecânica de água), 3) Secagem evaporativa e 4) Acabamentos. Destas quatro, a etapa mais intensiva em energia é a secagem.

Formação de Papel a Seco

A formação a seco já é usada em materiais semelhantes ao papel, como os absorventes para produtos de higiene pessoal, equipamento médico, etc. Nesta técnica não existe adição de água, e as fibras são dispostas por *carding* (processo mecânico) ou por assentamento por ar (suspensão de fibras em ar). A coesão entre as fibras é assegurada por adição de resinas às fibras ou pela aplicação de um polímero de látex às folhas já formadas. A técnica de assentamento por ar permite uma maior velocidade de produção e um melhor controlo.
Estima-se que esta técnica aplicada à indústria de papel possa representar uma redução dos custos de investimento para 1/3 ou metade dos correspondentes a uma fábrica de papel convencional. Outra grande vantagem é a eliminação de efluentes, o que pode permitir a localização da fábrica mais perto dos centros de procura. No entanto, estas máquinas não alcançam ainda a velocidade de produção desejada pelos fabricantes.

Secagem por impulso [22]

A secagem por impulso é uma técnica que melhora a remoção mecânica de água do papel antes de este ser submetido à secagem propriamente dita, permitindo uma redução do consumo energético desta operação. Nesta técnica, o papel é exposto a temperaturas muito altas para reduzir significativamente a humidade (para teores iguais ou inferiores a 38 %) antes de entrar na fase de secagem propriamente dita.

O secador por impulso pode resultar da reconversão a ser incorporado numa máquina já existente ou numa máquina nova, aumentando significativamente a taxa de secagem nesse equipamento (50 a 500 vezes). Com a introdução de um secador de impulso, a secção de secagem pode ser reduzida, o que leva a menores custos de investimento.

Com esta técnica, os custos de operação e de manutenção globais da unidade de secagem, mantém-se praticamente iguais. Os resultados de testes piloto efectuados no Canadá e nos EUA, com rolos rotativos aquecidos por indução eléctrica, mostram que a redução do consumo de energia primária no processo de secagem pode atingir os 15 %.

Outras vantagens da utilização da secagem por impulso, são o aumento da produtividade e a produção de papel mais fino, suave e resistente do que o obtido pelo processo convencional de secagem.

Secagem por *Condensing Belt*

Na prática corrente, após a formação da folha de papel e da sua prensagem, esta segue através de uma série de cilindros aquecidos internamente com vapor, atingindo uma consistência final de 90 - 95 % de sólidos. A tecnologia de *condensing belt* realiza a secagem da folha de papel por contacto desta com uma banda de aço contínua aquecida por gás ou vapor. Do outro lado da folha encontram-se uma rede de malha fina, uma rede de malha grossa e uma banda de aço arrefecida exteriormente. A água evaporada passa através das redes e condensa na banda arrefecida, sendo o condensado removido por pressão e aspiração.

Esta técnica tem a capacidade de substituir as secções de secagem tradicionais e apresenta taxas de secagem 5 a 15 vezes superiores. A poupança de vapor é estimada em 10 - 20 %.
A principal desvantagem desta técnica é que o custo de investimento associado pode ser o dobro comparativamente a uma secagem convencional (valor estimado).

Recuperação de calor na indústria do papel

Na secção de secagem de uma indústria convencional de produção de papel podem chegar a existir 40 - 50 cilindros de secagem que são aquecidos internamente com vapor. Durante a secagem, a água abandona o papel ao ser arrastada pelo ar pré-aquecido, libertando-se vapor saturado de baixa pressão. O objectivo dos sistemas de recuperação de calor é a conversão deste vapor de baixa qualidade em calor útil.

Existem vários sistemas para este fim, sendo um deles a instalação de coberturas fechadas nas secções de secagem. Esta construção permitirá a redução do consumo de ar em cerca de metade, reduzindo assim a quantidade de calor a fornecer ao mesmo, para além da redução de energia eléctrica nos ventiladores. Outros sistemas potenciais envolvem a utilização de bombas de calor e a recompressão mecânica do vapor (RMV). Uma técnica que pode ser directamente aplicada aos cilindros de secagem é a utilização de sifões estacionários para uma melhor extracção de vapor dos mesmos. O calor pode também ser recuperado pela ventilação da secção de secagem, sendo este ar aquecido utilizado para o aquecimento das instalações.

Esta tecnologia permite uma redução do consumo de energia térmica e eléctrica, no entanto apresenta um investimento razoavelmente elevado, principalmente na RMV.

2.2.8 QUÍMICOS, PLÁSTICOS E BORRACHA

Nos últimos anos, a indústria química dos países da UE-25 tem feito um grande esforço para melhorar a sua eficiência energética através da redução do consumo de fuelóleo e da electricidade por unidade de produção. Em 2004, o consumo energético por unidade de produção dos países da UE-25 era 12 % menor do que em 1996 e 39 % menor do que em 1990 [42].

Uma boa parte do esforço que a indústria química tem gasto para melhorar a sua eficiência energética, centra-se na Intensificação de Processos. De acordo com Stankiewicz e Moulijn [45], a intensificação de processos consiste no desenvolvimento de novos aparelhos e técnicas que, em comparação com os (equipamentos e técnicas) processamento, diminuindo substancialmente a razão tamanho do equipamento/capacidade de produção, o consumo energético ou a produção de efluentes, e em última análise, resultem em tecnologias mais baratas e sustentáveis.

As tecnologias que se referem de seguida são tecnologias passíveis de ser incluídas em projectos que tenham como objectivo, o aumento da intensidade dos processos químicos.

2.2.8.1 Novas operações de separação [22]

A maioria dos processos de separação referidos como possíveis produtores de economia energética encontra-se no domínio dos processos de membranas.

Nas secções 2.1.4.2 e 2.2.8.1, respectivamente, foram já referidas as vantagens da possível aplicação de processos de membranas para o tratamento de águas residuais e para uma grande variedade de aplicações do sector da Alimentação e Bebidas.

De todos os processos de membranas que podem ser utilizados na indústria química, alguns deles são os seguintes: microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração, osmose inversa, permeação gasosa, pervaporação, electrodiálise, separação com membranas líquidas, reactores de membranas com separação, etc. Em particular, Martin *et al.* [22] seleccionaram dois destes processos de membranas como sendo tecnologias emergentes com um potencial de sucesso elevado ou médio se aplicados no sector da indústria química. São eles, os processos de separação de gases e os processos de separação que utilizam membranas líquidas.

Os vários componentes de uma mistura são difíceis de separar quando esta se encontra na fase gasosa e normalmente tal ocorre através do uso de adsorventes. A separação de gases através da permeação gasosa é uma alternativa credível aos processos de adsorção. Outro mercado com elevado potencial para as membranas permeáveis a gases é o mercado das pilhas de combustível.

Os processos de separação que utilizam membranas líquidas são uma alternativa à extracção e consomem menos energia. No caso da separação de uma mistura de álcool isopropílico e água, a redução do consumo de energia pode atingir os 60 %. Além disso, os custos de investimento são também menores. No entanto, os custos operacionais destes separadores com membranas líquidas tendem a ser mais elevados do que os das tecnologias concorrentes, para além do facto de poder ser necessário substituir frequentemente as membranas.

2.2.8.2 Utilização de novos catalisadores [22]

Nas últimas décadas tem havido um enorme progresso no desenvolvimento de novos sistemas catalíticos. Actualmente, cerca de 80 % dos processos químicos industriais dependem de catalisadores para funcionarem eficientemente.

Estão a ser desenvolvidos novos catalisadores e novos processos catalíticos que têm como objectivo a obtenção de processo químicos que consumam menos energia e que utilizem compostos menos agressivos para o ambiente. Uma das áreas mais promissoras da investigação catalítica é aquela que diz respeito aos catalisadores de nanoescala.

Como a quantidade de compostos produzidos pela indústria química é tão diversa, é difícil prever qual o impacto específico dos novos catalisadores. No entanto, como exemplo, tem-se que a existência de novos catalisadores para a produção do etileno pode levar a uma redução do consumo de energia do processo produtivo em 20 %.

2.2.8.3 Optimização das destilações

A destilação é uma operação unitária muito usada para a separação de misturas multicomponentes, apesar de ser uma operação consumidora intensiva de energia e de ter uma eficiência termodinâmica baixa. O facto das destilações consumirem muita energia, significa que contribuem significativamente para a emissão de gases com efeito de estufa.

Devido à orientação estratégica actual no âmbito dos processos de separação, o desenvolvimento de novos esquemas de destilação capazes de reduzir os custos anuais totais, tem ganho um crescente interesse. Segundo Barroso-Muñoz *et al*. [46], uma excelente opção para atingir este objectivo é a instalação de Sistemas de Destilação com Acoplamento Térmico (*TCDS*, *Thermally Coupled Distillation Systems*). Estes sistemas possibilitam a obtenção de poupanças energéticas de quase 50 % em relação ao valor base dos sistemas de destilação convencionais

Outro esquema de destilação que pode gerar economias energéticas elevadas, é o Método de Integração de Calor Interno [47]. Este método tem várias variantes (é na realidade uma classe de métodos) e os sistemas que recorrem a este método usam colunas de destilação com integração de calor (*HIDiC*, *Heat Integrated Destilation Collumns*). Um esquema de uma coluna *HIDiC* é apresentado na Fig. 2.28.

Kataoka *et al.*[47] concluíram que se este tipo de métodos de integração de calor interno for aplicado a um grande número de colunas de destilação, então será realizada uma grande contribuição para a intensificação de processos na indústria química. Em suma, estes autores afirmam que estes métodos poupam grandes quantidades de energia e reduzem as emissões de gases com efeito de estufa.
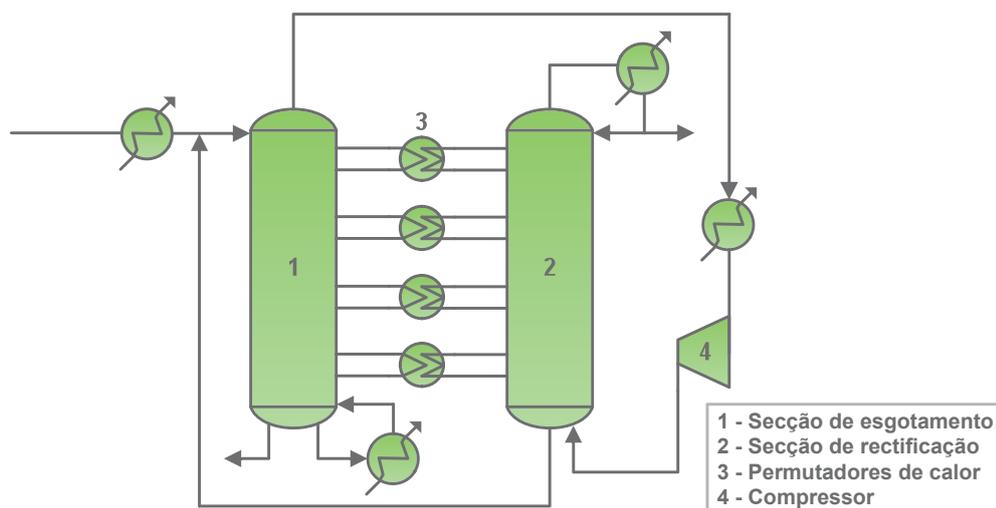
Fig. 2.28/ Esquema de uma coluna HIDiC (coluna única) constituída por um método de integração de calor interno. Figura retirada e adaptada de [47].

2.2.9 SIDERURGIA

2.2.9.1 Melhoria dos fornos eléctricos [22]

A produção de aço utilizando fornos de arco eléctrico (FAE) utiliza uma forte corrente eléctrica para fundir e refinar a sucata ou o *Direct Reduced Iron* (*DRI*). Existem diversas variantes deste processo utilizando corrente alternada ou contínua, no entanto, podem ser injectados combustíveis no processo de modo a reduzir o consumo de electricidade.

Embora os FAEs modernos sejam mais eficientes energeticamente, existem tecnologias disponíveis para aumentar a eficiência energética dos já existentes, p.ex., controlo de processo, transformadores eficientes, utilização de queimadores *oxy-fuel,* agitação inferior, pós-combustão e pré-aquecimento da sucata.

Encontram-se em desenvolvimento diversas concepções de FAEs, que combinam algumas das tecnologias para aumentar a eficiência energética referidas no parágrafo anterior. Estes novos desenhos levarão a menores custos operacionais devido à redução do tempo de ciclo do processo, à menor utilização de eléctrodos e de refractário, à redução dos custos de limpeza do ar e à redução dos custos energéticos.

2.2.9.2 Processos de *smelting reduction* [22]

Os processos de *smelting reduction*,correntemente em desenvolvimento, combinam a gaseificação do carvão com a redução directa de óxidos de ferro. Desta forma, estes processos eliminam as necessidades de coque e de preparação do minério de ferro. Este é pré-reduzido pelos gases provenientes de um banho quente, sendo depois fundido nesse mesmo banho. O processo produz gás em excesso, que pode ser usado para geração de electricidade e produção de ferro reduzido directamente, ou como combustível. Estima-se que a redução de energia em comparação com o processo tradicional seja na ordem de 20 - 30 %.

Esta tecnologia apresenta também um custo de investimento bastante mais reduzido, menores custos de material (podendo ser usado carvão normal em vez de carvão metalúrgico) e um melhor controlo da poluição, além de que é muito mais vantajosa para capacidades mais pequenas de produção. Como não envolve a preparação de coque nem tratamento do minério, a quantidade de partículas libertadas é também bastante reduzida, implicando também assim uma redução nos custos de operação.

2.2.9.3 Fundição e conformação simultâneas [22]

Actualmente, o processo de moldagem e formação das barras e lingotes de aço é na maioria dos casos, um processo com vários passos. A fundição e conformação simultâneas é uma tecnologia mais recente que integra a fundição e a deformação do aço num único passo processual, reduzindo assim a necessidade de reaquecer o aço antes de o deformar.

Devido à eliminação dos fornos de reaquecimento, é expectável que o custo de investimento de uma unidade que utilize este processo seja inferior aos custos correntes num processo convencional. As estimativas apontam para reduções de 30 a 60 % em relação às práticas correntes. Espera-se também que os custos de operação e de manutenção desçam 20 a 25 %, embora estas reduções dependam muito das circunstâncias locais. Outra vantagem desta tecnologia é que reduz significativamente as emissões de poeiras, melhorando o ambiente dentro da instalação.

2.2.10 TÊXTIL

São sugeridas as seguintes medidas específicas para o sector Têxtil [48]:

- Optimização de banhos;
- Pré-secagem mecânica/infravermelha (IV) antes da secagem térmica;
- Aquecimento de águas por painéis solares;
- Optimização dos processos de produção têxtil.

2.2.10.1 Optimização do funcionamento dos banhos

A optimização de funcionamento dos banhos inclui:

- A adopção de máquinas de tingimento com relações de banho reduzidas;
- A optimização de processos de tingimento e acabamento em processos descontínuos, por eliminação de algumas etapas ou banhos;
- Utilização de substratos (produtos químicos, corantes, produtos auxiliares têxteis, enzimas, etc.) que promovam uma maior eficiência para se obter os mesmos resultados com menores temperaturas, quantidades de água e tempos de processo.

2.2.10.2 Optimização dos processos de produção têxtil

A optimização de processos de produção têxtil inclui:

- Utilização de tecnologias emergentes, p.ex., tecnologia plasma, tecnologia de ozono, tingimento por ultra-sons, preparação enzimática, branqueamento catalítico, tecnologia jacto de tinta (estamparia digital), aplicação de nanotecnologias, polimerização por ultravioletas, fluidos dióxido de carbono – supercrítico (CO_2), para tingimento sem água;
- Utilização de novas tecnologias para produção de estruturas filiformes (fiação, extrusão e retorcedura e para a produção de estruturas têxteis (tecidos, malhas, não tecidos, entrançados e híbridos) mais eficientes.

2.2.11 VESTUÁRIO, CALÇADO E CURTUMES

São sugeridas as seguintes medidas específicas para o sector do Vestuário, Calçado e Curtumes:

- Melhorias em limpeza / banhos;
- Tecnologias de corte e união de peças;
- Aquecimento de águas por painéis solares.

A energia consumida pelas indústrias dos curtumes, depende de diversos factores tais como, o tipo, capacidade e quantidade de produção, tipo de estado dos equipamentos, a existência ou não de sistema de tratamento de efluentes, existência de práticas para a eficiência energética, entre outros factores.

Em geral, e segundo alguns estudos efectuados, no processo de curtumes o consumo de energia verifica-se sob a forma de energia térmica (85 %) e energia eléctrica (15 %).

Os sectores que mais energia consomem na indústria de curtumes são os processos de recurtume e respectiva secagem e o acabamento. A energia térmica é necessária para os processos de secagem dos couros, obtenção de água quente ou aquecimento dos banhos de processo. A energia eléctrica é utilizada para os equipamentos em geral e iluminação.

Existem algumas técnicas emergentes, cujo objectivo também passa pelo uso racional de energia, entre as quais se destacam:

- Redução do consumo de água e energia em banhos de tingimento, na fase de recurtume:

De acordo com os resultados obtidos num estudo efectuado no CTIC (PROJECTO PRODECO - Desenvolvimento de produtos químicos e ecológicos para a indústria do couro - Projecto IDEIA/PRIME 2006/2007) os processos de recurtume compactos permitem em relação aos processos normais, a redução do consumo de energia eléctrica em cerca de 14 % e a redução da energia térmica em cerca de 70 %.

- A optimização energética do processo de secagem pós-tingimento:

Permitem maximizar a eficiência da operação do estiramento de forma a reduzir o tempo e temperatura de vazio.

- Aquecimento de águas por sistema solar térmico:

No recurtume, os banhos atingem temperaturas da ordem dos 60 ºC (energia térmica). É possível, com a instalação de painéis solares térmicos aproveitar a radiação solar para o aquecimento da água necessária para os banhos.

2.2.11.1 Tecnologias de corte e união de peças

A medida denominada "Tecnologias de corte e de união de peças" inclui:

- A utilização de novas tecnologias de corte (p.ex., *laser* e ultrasons);
- A utilização de novas tecnologias de união de peças (p.ex., substituição de costura de linhas por costuras seladas e colagem através de entretela com temperatura e pressão).

2.2.12 VIDRO

2.2.12.1 Optimização de fornos [17][49]

O tempo de vida útil dos fornos de fusão de vidro a funcionar em regime contínuo ronda os 12 - 15 anos. Nesse período, as vidreiras devem dedicar esforços importantes em I&D, de modo a incorporarem, na altura da instalação de um novo forno, as melhores tecnologias disponíveis em matéria de materiais refractários, combustão, recuperação de calor, etc.

A instalação de fornos novos e optimizados leva a uma diminuição do consumo energético do sector. Os fornos optimizados usados na indústria vidreira, nomeadamente os fornos regenerativos e os fornos de recuperação, recorrem à tecnologia de combustão com ar a alta temperatura cujas principais características foram apresentadas na secção 2.1.2.2.

Os fornos regenerativos utilizam sistemas regenerativos de recuperação de calor e usualmente possuem queimadores dentro ou por baixo das portas de admissão de ar/exaustão de gases. Nos fornos regenerativos de combustão cruzada, as portas de combustão e os queimadores situam-se ao longo dos lados do forno e as câmaras do regenerador estão localizadas em ambos os lados do forno. Nos fornos regenerativos de combustão final os princípios de operação são similares, no entanto, estes fornos possuem as duas câmaras do regenerador num dos topos do forno.

Os fornos de recuperação utilizam permutadores de calor (recuperadores) para o pré-aquecimento contínuo do ar de combustão, através do aproveitamento do calor contido nos gases de exaustão. Nos recuperadores metálicos, as temperaturas de pré-aquecimento podem atingir cerca de 800 °C. A capacidade específica de fusão dos fornos de recuperação é cerca de 30 % inferior à dos fornos regenerativos. Este tipo de forno é sobretudo indicado quando é necessária uma elevada flexibilidade de operação com um custo mínimo de capital inicial, em particular nos casos em que o tamanho da operação é demasiado pequeno para que o uso de regeneradores seja economicamente viável. Assim, este tipo de forno é mais apropriado para instalações de pequena capacidade apesar de não serem invulgares os fornos de alta capacidade (até 400 toneladas por dia).

Apesar das reduções energéticas resultantes de melhorias na concepção dos fornos, o período de *payback* destas medidas não é muito atractivo, podendo atingir os 8 anos.

Na literatura encontram-se referenciadas outras medidas para o aumento da eficiência energética dos fornos de produção de vidro, entre as quais se encontram as seguintes:

- Pré-aquecimento das matérias-primas que são alimentadas ao forno;
- Utilização de oxigénio ou ar enriquecido na combustão.

2.2.12.2 Utilização de vidro usado (reciclado) [22]

Embora os recipientes de vidro já contenham em média mais de 20 % de vidro usado, esta percentagem pode ser bem mais elevada: na Europa chega a produzir-se vidro com 80 % de vidro usado, chegando já a haver fornos que trabalham exclusivamente com vidro usado ou reciclado (casco). Um incremento de 10 % na utilização de vidro usado implica uma redução de 2,5 % na factura de combustível. A utilização de 100 % vidro usado permite uma redução ainda maior de energia porque pode ser fundido a uma temperatura inferior à tipicamente usada, que é de 1550 ºC, uma vez que não há areia a derreter. Também se consegue uma redução no consumo de soda. No entanto, o custo com o processamento do vidro usado irá aumentar igualmente, uma vez que tem que ser garantida a qualidade do vidro reciclado.

A eficiência energética do processo pode ser incrementada através do pré-aquecimento descontínuo do vidro usado. O pré-aquecimento é uma forma eficaz de recuperar o calor sensível dos gases de combustão. No pré-aquecedor, o vidro usado é aquecido até uma temperatura de 300 - 540 ºC através de contacto directo com os gases de queima. O pré-aquecimento reduz os gastos energéticos do forno, a utilização de oxigénio e o tempo de fusão, permitindo uma maior produção e aumentando a longevidade da fornalha.

A utilização de vidro usado permite que, no caso da instalação de um forno novo, este seja de menores dimensões, reduzindo assim o custo de investimento. Além disso, as menores temperaturas de trabalho e o menor consumo de combustível reduzem as emissões de NO_X e a emissão de óxidos de enxofre (SO_X) pode também ser diminuída se o teor de sulfato de sódio no material bruto for reduzido.

Todavia, o pré-aquecimento pode levar à necessidade de um sistema adequado de lavagem de gases. De facto, temperaturas altas e tempos longos de pré-aquecimento provocam um aumento na emissão de monóxido de carbono (CO) e de dioxinas, tornando necessária uma escolha rigorosa e um tratamento adequado do vidro usado, tal como a remoção de contaminantes inertes e resíduos orgânicos.

3.
NOTAS FINAIS

O presente documento propõe-se divulgar, duma forma acessível à generalidade dos responsáveis e técnicos industriais, a fundamentação e enquadramento tecnológico relativo às medidas oficialmente já apresentadas no âmbito da aplicação à Indústria Portuguesa do Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética (PNAEE) – Portugal Eficiência 2015.

Foi assim preocupação dos autores descreverem de forma sucinta, nos capítulos precedentes, as principais medidas que se encontram disponíveis para ser aplicadas na Indústria em Portugal, procurando-se, para além dos aspectos tecnológicos, referir-se sempre que adequado, o enquadramento ambiental, económico e legal ligado à concretização de algumas destas medidas.

Para os técnicos especialistas das questões energéticas que, nas empresas industriais, na administração pública, nas empresas de consultoria, e nos estabelecimentos de ensino superior, pretendam levar ainda mais longe o seu conhecimento sobre os fundamentos tecnológicos das medidas aqui apresentadas, a lista bibliográfica subsequente permitirá certamente apoiar esse esforço de pesquisa complementar. Como manual de apoio dinâmico este documento estará sempre aberto a novos contributos, sugestões e críticas construtivas, bem como à introdução de outras tecnologias aqui ainda não mencionadas e que se venham a revelar importantes para o aumento da eficiência energética na indústria.

O desafio do aumento da eficiência energética é um trabalho que já foi iniciado há algum tempo, mas que certamente se prolongará ainda por muitos anos. A indústria é um dos sectores económicos que mais esforços tem feito nesse sentido, e que mais resultados práticos têm alcançado, por isso o presente documento pretende dar agora um incentivo decisivo a todos aqueles que têm sido responsáveis por esse importante contributo para a competitividade da economia portuguesa a irem ainda mais longe, e também dar uma motivação adicional para que muitos mais se juntem a esse objectivo que é de todos nós.

4.
BIBLIOGRAFIA

[1] Relatório Interno da ADENE/DGEG, Fevereiro 2008.

[2] http://www.energy.eu/index.php#CO2-focus

[3] Direcção-Geral da Energia e dos Transportes / Comissão Europeia, “Fazer mais com menos – Livro verde sobre a eficiência energética”, Serviço das Publicações Oficiais das Comunidades Europeias, 2005.
http://ec.europa.eu/energy/demand/policy/doc/2005_06_green_paper_book_pt.pdf

[4] Commission of the European Communities, “Action plan for energy efficiency: Realising the potential”, Communication from the Commission, Brussels, Outubro 2006.
http://ec.europa.eu/energy/action_plan_energy_efficiency/doc/com_2006_0545_en.pdf

[5] http://www.diramb.gov.pt/data/basedoc/TXT_LC_25981_1_0001.htm

[6] Danish Ministry of Transport and Energy, “Action plan for renewed energy-conservation - Energy conservation and the market”, Setembro 2005 (Tradução não-oficial).
http://ec.europa.eu/energy/demand/legislation/doc/neeap/denmark_en.pdf

[7] http://www.ens.dk/sw12329.asp

[8] http://www.energiledelse.com/visArtikel.asp?artikelID=1586

[9] M. Dybkjær Hansen, “The Danish experience with efficiency improvement in industrial and commercial sectors”, Workshop on Best Practices in Policies and Measures, Copenhagen, 8-10 Outubro 2001.
http://unfccc.int/files/meetings/workshops/other_meetings/application/pdf/hansen.pdf

[10] Department for Environment, Food and Rural Affairs – DEFRA (UK), “Energy efficiency - The Government’s plan for action”, Abril 2004.
http://www.archive2.official-documents.co.uk/document/cm61/6168/6168.pdf

[11] European Comission/ Joint Reseach Center, “IPPC Draft Reference Document on Energy Efficiency Techniques”, Draft, Abril 2006.

[12] European Comission/ Joint Reseach Center, “IPPC Reference Document on BAT in the Ceramic Manufacturing Industry”, Dezembro 2006.

[13] European Comission, “IPPC Reference Document on BAT in the Cement and Lime Manufacturing Industries”, Dezembro 2001.

[14] European Comission, “IPPC Reference Document on BAT in the Ferrous Metals Processing Industry”, Dezembro 2001.

[15] Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía – IDAE, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, “Estrategia de ahorro y eficiencia energética en España 2004-2012, E4 - Resumen del plan de acción 2005-2007”, Julho 2005. http://www.idae.es/central.asp?d=109909&i=es&a=p1

[16] Secretaria de Estado de Energía, Desarrollo Industrial y de la Pequeña y Mediana Empresa – Ministerio de Economía, “Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012 – 2. Subsector Alimentacción, Bebidas y Tabaco”, Novembro 2003.

[17] Secretaria de Estado de Energía, Desarrollo Industrial y de la Pequeña y Mediana Empresa – Ministerio de Economía, “Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012 – 3. Subsector Minerales No Metálicos”, Novembro 2003.

[18] Secretaria de Estado de Energía, Desarrollo Industrial y de la Pequeña y Mediana Empresa – Ministerio de Economia, “Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012 – 5.6 Subsector Madera, Corcho e Muebles”, Novembro 2003.

[19] Secretaria de Estado de Energía, Desarrollo Industrial y de la Pequeña y Mediana Empresa – Ministerio de Economía, “Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012 – 5.4 Subsector Transformados Metálicos”, Outubro 2003.

[20] Secretaria de Estado de Energía, Desarrollo Industrial y de la Pequeña y Mediana Empresa – Ministerio de Economía, “Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012 – 5.3 Subsector Metalurgia No Férrea”, Novembro 2003.

[21] E. Worrell, J-W. Bode, J. de Beer, “Analysing research and technology development strategies – The ‘Atlas’ project: Energy efficient technologies in industry”, Utrecht University, Holanda, 1997.
http://igitur-archive.library.uu.nl/copernicus/2006-0314-200149/97001.pdf

[22] Martin N., Worrell E., Ruth M., Price L. et al., “Emerging energy-efficient industrial technologies”, Report LBNL46990, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Outubro 2000.
http://ies.lbl.gov/iespubs/46990.pdf

[23] International Energy Agency (IEA), “Energy Technology Perspectives – Scenarios & Strategies to 2050”, 2006.
http://www.iea.org

[24] International Energy Agency (IEA), “Tracking Industrial Energy Efficiency and Co Emissions – Energy Indicators”, 2007.
http://www.iea.org

[25] A. de Almeida, F. Ferreira, D. Both, “Technical and economical considerations in the application of variable-speed drives with electric motor systems”, IEEE Transactions on Industry Applications, 41(1), Janeiro/Fevereiro 2005, pp. 188-199.

[26] http://www.aeportugal.pt

[27] ADENE, “Cursos de Utilização Racional de Energia – Eficiência Energética na Indústria”, Gaia, Janeiro 2004.
http://www.adene.pt/ADENE.Portal

[28] European Commission/CEMEP, “Electric motor efficiency – Saving Europe’s energy and environment”, 2003.
http://re.jrc.cec.eu.int/energyefficiency/eurodeem/pdf/motor_brochure_v3.pdf

[29] http://www.cemep.org

[30] A. de Almeida, F. Ferreira,P. Fonseca, B. Chretien, H. Falkner, J. Reichert, M. West, S. Nielsen, D. Both, “VSDs for electric motor systems”, SAVE II Final Report, 2001.
http://re.jrc.cec.eu.int/energyefficiency/motorchallenge/pdf/VSDs-SAVE-Study-Final-Report.pdf

[31] ISR-UCoimbra, ADENE, ADEME, “Guia Técnico Programa Motor Challenge – Soluções para melhorar os sistemas accionados por motores eléctricos”, 2007.

[32] Radgen P., Blaustein E. (Eds.), “Compressed Air Systems in the European Union - Energy, Emissions, Savings Potential and Policy Actions”, LOG_X Verlag GmbH, Estugarda, 2001.

[33] http://www.conae.gob.mx

[34] American Council for an Energy-Efficient Economy, “Online Guide to Energy-Efficient Commercial Equipment Lamps: Making Light Efficiently”.
http://www.aceee.org/ogeece/ch2_lamps.htm

[35] P. Dockrill, F. Friedrich, “Boilers and Heaters: Improving Energy Efficiency”, Natural Resources Canada’s Office of Energy Efficiency (NRCan’s OEE), Agosto 2001.
http://oee.nrcan.gc.ca/publications/infosource/pub/cipec/boilersheaters.pdf

[36] U.S. Department of Energy, “Motor Challenge Fact Sheet: Reducing power factor cost”.
http://motors.copperwire.org/Files/doe-power_factor.pdf

[37] U.S. Environmental Protection Agency, “Energy trends in selected manufacturing sectors: Opportunities and challenges for environmentally preferable energy outcomes”, Final Report, Março 2007.

[38] http://www.pollutioncontrolsystems.com/vacuum_distillation.htm

[39] Comissão Consultiva para a Prevenção e Controlo Integrados da Poluição – Grupo de Trabalho para o Sector Cimento, “Melhores Técnicas Disponíveis no Sector Cimenteiro Nacional”, Dezembro 2002.

[40] CELPA, AIMMP, “Centrais Eléctricas de Biomassa Uma Opção Justificável? Posição conjunta da CELPA e da AIMMP sobre Biomassa para Energia”, Lisboa, Dezembro 2004.

[41] Contribuição da Associação Portuguesa de Fundição, “O consumo energético no sector de fundição nacional”.

[42] CEFIC, “Facts and Figures: The European chemical industry in a worlwide perspective”, Dezembro 2006.

[43] Relvas S., Fernandes M.C. Matos H.A., Nunes C.P., “Integração de Processos: Uma metodologia de optimização energética e ambiental”, Dezembro 2002.

[44] Gundersen T., “A Process Integration PRIMER”, 3rd edition, SINTEF Energy Research, Abril 2002.

[45] A.J. Stankiewicz, J.A. Moulijn, “Process intensification: transforming chemical engineering”, Chem. Eng. Progress, Janeiro (2000) 22-34.

[46] F. O. Barroso-Muñoz, S. Hernández, J. G. Segovia-Hernández, H. Hernández-Escoto, A.F. Aguilera-Alvarado, “Thermally Coupled Distillation Systems: Study of an Energy-efficient Reactive Case”, Chem. Biochem. Eng. Q., 21 (2007) 115-120.

[47] K. Kataoka, H. Noda, T. Mukaida, M. Kaneda, H. Yamaji, K. Horiuchi and M. Nakaiwa, “Energy-Saving Process Intensification of an Oil Refinery Distillation Plant by an Internal Heat Integration Method”, Proceedings of European Congress of Chemical Engineering (ECCE-6), Copenhaga, 16-20 Setembro 2007.

[48] Contribuição do CITEVE, “Proposta de medidas específicas para o sector Têxtil e do Vestuário”, Setembro 2007. http://www.citeve.pt

[49] European Comission, “IPPC Reference Document on BAT in the Glass Manufacturing Industry”, Dezembro 2001.

[50] Energy Information Administration / U.S. Department of Energy, “Annual energy outlook 2007 - With projections to 2030”, Washington, Fevereiro 2007.

5.
FICHA TÉCNICA

Título
Medidas de Eficiência Energética Aplicáveis à Indústria Portuguesa:
Um Enquadramento Tecnológico Sucinto

Edição
ADENE - Agência para a Energia

Data
Julho de 2010

Tiragem
5000 exemplares

ISBN
978-972-8646-18-9

Deposito legal
312772/10

Para mais informações contactar
ADENE - Agência para a Energia
R. Dr. António Loureiro Borges, nº 5, 6º piso
Arquiparque- Miraflores 1495-131 Algés
E-mail: geral@adene.pt
Site: www.adene.pt

Design
RMAC

Fotos
Casa da Imagem
Corbis
ECOMAX® and Elster LBE.
Gettyimages
Jonh Ffox Images - Image 4 Communication
Tips

Publicação gratuita